ADAPTIV ZIRKULÄR ZUKUNFT

FELIX-FECHENBACH-BERUFSKOLLEG

ADAPTIV ZIRKULÄR ZUKUNFT

TRANSFORMATION DES FELIX-FECHENBACHBERUFSKOLLEGS DURCH INTEGRATION VON ZIRKULÄREN UND ADAPTIVEN ENTWURFSMETHODEN

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
University of Applied Sciences and Arts

Fachbereich Detmolder Schule für Gestaltung
MIAD Master Integrated Architectural Design

Master-Thesis
Zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

Prof.'in Dr. Susanne Schwickert
und Prof.'in Stephanie Stratmann BDA

Vorgelegt von
Christin Schäfers B.A.
aus Schlangen | 15397007

Eingereicht am 16. Juni 2025

AUFGABENSTELLUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, das Transformationspotenzial eines Bestandsgebäudes im Kontext zirkulärer und adaptiver Architektur zu untersuchen. Ausgangspunkt ist die Feststellung, dass viele Bestandsbauten trotz konstruktiver, materieller und stadträumlicher Qualitäten zugunsten von Neubauten ersetzt werden. Dadurch gehen nicht nur Ressourcen, sondern auch funktionale und kulturelle Werte verloren.

Am Beispiel des Felix-Fechenbach-Berufskollegs in Detmold wird analysiert, wie Bestandsstrukturen ressourcenschonend, nutzungsflexibel und kreislauffähig weiterentwickelt werden können. Die Untersuchung erfolgt auf drei Ebenen: städtebaulich, architektonisch und bauteilbezogen. Bewertet werden Aspekte wie Materialtrennung, Schadstoffbelastung, Wiederverwendbarkeit, Nutzungsstruktur und soziale Anforderungen.

Ergänzt wird die Analyse durch theoretische Konzepte der adaptiven Wiederverwendung, der Schichtentrennung nach Steward Brand sowie der Circular Economy. Fallstudien liefern Referenzen für funktionale und konstruktive Strategien. Digitale Tools wie Concular und der Urban Mining Index ermöglichen eine quantitative Bewertung der Rückbau- und Wiederverwertungspotenziale.

Auf dieser Grundlage entstehen Entwurfsvarianten, die unterschiedliche Transformationsszenarien darstellen. Ziel ist die Entwicklung eines anwendungsorientierten Bewertungsrasters, das Planungsentscheidungen im Bestand unterstützt und zur Umsetzung zukunftsfähiger und zirkulärer Architekturkonzepte beiträgt.

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeiten einer zukunftsfähigen Transformation von Bestandsgebäuden am Beispiel des Felix-Fechenbach-Berufskollegs in Detmold. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass viele bestehende Gebäude trotz funktionaler und materieller Potenziale aus architektonischer und wirtschaftlicher Perspektive häufig abgewertet oder durch Neubauten ersetzt werden. Ziel der Untersuchung ist es, Strategien zu entwickeln, wie Bestandsgebäude unter Berücksichtigung von architektonischer Adaptionsfähigkeit, Kreislauffähigkeit und Nutzeranforderungen nachhaltig weiterentwickelt werden können. Grundlage bildet eine mehrdimensionale Analyse, die theoretische Modelle, Fallstudien adaptiver und zirkulärer Architektur, eine gestufte Bestandsuntersuchung sowie eine Entwurfsentwicklung in Varianten umfasst. Die Arbeit verbindet qualitative und quantitative Bewertungsmethoden und integriert dabei digitale Werkzeuge, Materialanalysen sowie Perspektiven der Nutzerinnen und Nutzer. Durch die Entwicklung einer anwendungsorientierten Umnutzungsmatrix werden konkrete Handlungsansätze formuliert, die auf andere Gebäudetypen übertragbar sind und zur Weiterentwicklung zirkulärer Planungsprozesse im Bestand beitragen können.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mir bei der Ausarbeitung dieser Arbeit unterstützt und somit zum Gelingen beigetragen haben.

Frau Prof.'in Dr. Susanne Schwickert sowie Frau Prof.'in Stephanie Stratmann BDA danke ich besonders für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die hilfreichen Anregungen und konstruktive Zusammenarbeit sowie die Möglichkeit, meine individuellen Interessen in der Master-Thesis zu vertiefen. Eure fundierte Rückkopplung sowohl zur Entwurfsidee als auch zur bilanztechnischen Bewertung der Zirkularität hat die Tiefe dieser Arbeit wesentlich mitgeprägt. Danke für die stets offenen, fördernden und gleichzeitig fordernden Worte!

Bedanken möchte ich mich auch bei dem Team des Lehrgebiets „Bauphysik und Technischen Ausbau": Lisa, Ruth, Marie, Anika und Leon ihr hattet stets ein offenes Ohr und habt mich auch durch den Austausch untereinander von Ergebnissen und Besuchen von Fachtagungen immer noch mal einen anderen Blick gegeben und Mut entwickeln lassen. Danke für das kollektive Mitfiebern und das Supporten!

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Raphael und Christa sowie meinem Bruder Maximilian für eure Unterstützung und Ermutigungen während des gesamten Studiums und auch besonders in der Zeit der Anfertigung dieser Arbeit.
Bei uns stehen die Uhren niemals still und ich freue mich auf weitere Erfahrungen, die wir gemeinsam teilen werden!

INHALT

1			**EINLEITUNG**	**16**
2			**THEORETISCHE GRUNDLAGEN**	**22**
	2.1		ADAPTIVE WIEDERVERWENDUNG: SPACE OF TRANSITION	24
	2.2		ZIRKULÄRES BAUEN: SCHWERPUNKTE	25
		2.2.1	Form follows availability	27
		2.2.2	Form follows disassembly	28
		2.2.3	Rethink standards	33
	2.3		MESSBARKEIT VON KREISLAUFPOTENZIALEN: AKTUELLER STAND DER FORSCHUNG	36
		2.3.1	Kreislaufstrategien im Bauwesen	37
		2.3.2	Kreislauf- und Lebenszyklusbewertungstools	40
		2.3.2.1	Concular	40
		2.3.2.2	Urban Mining Index	52
	2.4		EINFLUSSGRÖßEN DER KREISLAUFFÄHIGKEIT	60
		2.4.1	Trennbarkeit für zukünftige Demontage: Lösbare Verbindungen	**50**
		2.4.2	Recyclingpotenzial der Baustoffe	71
		2.4.3	Wiederverwendung/ReUse	83
	2.5		KOSTENANALYSE	86
		2.5.1	Rechtliche Grundlagen	88
		2.5.2	Wirtschaftlichkeit von Instandsetzung und Rückbau	89
	2.6		ANFORDERUNGEN AN DEN SCHULBAU	94
		2.6.1	Landesbauordnung	94
		2.6.2	Typologische Anforderungen	96
3			**FALLSTUDIENANALYSE**	**100**
	3.1		HISTORISCHE ENTWICKLUNG DES ADAPTIVEN BAUENS	102
		3.1.1	Anarchitects	103
		3.1.2	Lingotto, Giacomo Matte-Trucco	105
		3.1.3	Gestalterische Prinzipien und Herausforderungen	110
	3.2		HISTORISCHE ENTWICKLUNG DES ZIRKULÄREN BAUENS	111
		3.2.1	Experimentalhaus R128, Werner Sobek	113
		3.2.2	Gestalterische Prinzipien und Herausforderungen	114

3.3 ZEITGENÖSSISCHE PROJEKTE ADAPTIVEN UND ZIRKULÄREN BAUENS 117
3.3.1 Bahnhof San Cristoforo, Studio Albori, 2006 117
3.3.2 Ecole Nationale Superieure d'Architecture, Lacaton & Vassal, Nantes, 2009 120
3.3.3 Gebäude Anton, diederendirrix architects, Eindhoven (NL), 2014 124
3.3.4 Department store Brixton, Squire Partner, London (GB), 2017 127
3.3.5 Karreveld Secondary school and sports center, AgwA, Brüssel, 2018 132
3.3.6 Bewertung der Fallbeispiele 135
3.4 FALLSTUDIE KALKULATION IM ZIRKULÄREN BAUEN 140
3.4.1 K.118 Winterthur 141
4 ANALYSE DES FELIX-FECHENBACH-BERUFSKOLLEGS 144
4.1 MAKRO-ANALYSE 146
4.1.1 Städtebauliche Einordnung 146
4.2 MIDI-ANALYSE 153
4.2.1 Historische Einordnung 153
4.2.2 Erschließungs- und Grundrissstruktur 156
4.3 MINI-ANALYSE 157
4.3.1 Schichtentrennung nach Brand: Bestand und Potenziale des Gebäudes 158
4.3.2 Schadstoffgutachten Firma Jockel 2022 170
4.3.3 Machbarkeitsstudie Concular 2023 174
4.3.4 Energetisches Sanierungskonzept ReBuild 2023 179
4.4 UMFRAGE 187
4.4.1 Perspektive der Bauherrschaft (Karen Zereike) 188
4.4.2 Perspektive der Lehrerschaft (Kai Schwabe) 190
4.4.3 Perspektive des Baubetriebs (Jolina Perreth) 193
4.4.4 Perspektive der Schülerschaft 196
4.4.5 Fazit 200
5 ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG ADAPTIVER UND ZIRKULÄRER ENTWURFSMETHODEN 204
5.1 POTENZIALE UND MÄNGEL DER GEBÄUDESTRUKTUR – ERKENNTNISSE AUS DER ANALYSE 206
5.2 ENTWICKLUNG DES WORKFLOWS ZUR ERFASSUNG EINES BESTANDSGEBÄUDES UND ENTWICKLUNG EINES ZIRKULÄREN, ADAPTIVEN KONZEPTS 212
5.2.1 Arbeit mit Concular im Planungsprozess 216
5.2.2 Bewertung der Arbeit mit Concular Pro und Cons der Dateneinpflegung und -herausgabe in Concular 221

5.2.3 Weiterentwicklung des zirkulären Bewertungstools in Excel 229
5.3 ENTWURF ADAPTIVER KONZEPTE FÜR DAS BERUFSKOLLEG 255
5.3.1 Variante 0 : Referenzgebäude 255
5.3.2 Variante 1: Basis 266
5.3.3 Variante 2: Lightning up 288
5.3.4 Variante 3:Leveling up 312
6 DISKUSSION UND AUSBLICK: HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN 336
6.1 TAKEAWAYS DER VIER VARIANTEN IM VERGLEICH: BEWERTUNG DER ENTWICKELTEN KONZEPTE UND DEREN ÜBERTRAGBARKEIT 338
6.2 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR ZIRKULÄRES BAUEN IM BESTAND 342
6.3 UMNUTZUNGSMATRIX FÜR WANDEL: PLANUNGSHILFE FÜR ZIRKULÄRES BAUEN 348
7 FAZIT 358
8 ANHANG 360
8.1 Übersicht der Bauteileingaben in Concular

ABBILDUNGEN

Abb. 1: Prinzipdiagramm zirkuläres Bauen 24
Abb. 2: Prinzipdiagramm form follwas availability 27
Abb. 3Prinzipdiagramm form follwas disassembly 29
Abb. 4: Prinzipdiagramm rethink standards 35
Abb. 5: Prinzipdiagramm Recyclingwege 38
Abb. 6: Zirkuläre Kalkulation in Concular 44
Abb. 7: Gründung mit Schaumglasschotter 63
Abb. 8: Winddichtung mit der Verbindungsart „tackern“ 65
Abb. 9: Klettverbindung bei Dachabdichtungs-Bahnen 67
Abb. 10: Klickverbindung Fußbodenbelag 69
Abb. 11: Einstufung des Recycling-Potenzials nach dem Recycling-Atlas 72
Abb. 12: Material-Cycle-Status bei Materialien zur Gründung und Tragwerk 73
Abb. 13: Material-Cycle-Status bei Materialien zu Dämmung 81
Abb. 14: Material-Cycle-Status bei Materialien zur Abdichtungen 82
Abb. 15: Material-Cycle-Status bei Materialien zur Verglasungen 82
Abb. 16: Recherchierte Bauteilbörsen und Handelsunternehmen 84
Abb. 17: Value-Hill-Prinzip zum Werterhalt von Baustoffen 87
Abb. 18: Prinzipskizze zu verschiedenen Typologiefeldern 97
Abb. 19: Gordon Matta-Clark während einer Subtraktion 103
Abb. 20: Organische „Cuts“der Anarchitects 104
Abb. 21: Umnutzungs-Strategie des Lingotto 106
Abb. 22: Rennstrecke auf dem ehemaligen FIAT Gebäude 109
Abb. 23: Blick auf das Experimentalhaus R128 von Werner Sobek 112
Abb. 24: Tragstruktur des Experimentalhaus R128 von Werner Sobek 115
Abb. 25: Blick auf den verlassenen Bahnhof San Cristoforo, 2006 117
Abb. 26: Entwurf zur Umnutzung des Bahnhof San Cristoforo, 2006 119
Abb. 27: Blick auf die Architekturschule in Nantes 121
Abb. 28: Großzügige Raumgeometrien schaffen verschiedene Möglichkeiten und lassen jegliche Umnutzung zu 122
Abb. 29: Blick auf das Gebäude Anton im Bauprozess 125
Abb. 30: Blick in die neu eingeschnittenen Treppenkerne zum Austausch von Licht und Lebensqualität 126
Abb. 31: Blick auf das Bestandsgebäude in London 128
Abb. 32: Umnutzng mit behutsamen Belassen der Bestands-Tragstruktur; Austausch durch gezielte Einschnitte 131
Abb. 33: Wettbewerbsbezogene Darstellung des Grundstücks in Brüssel 132
Abb. 34: Blick in den Flur mit den alt, aber neu eingesetzten

Bürotrennwänden und der nicht thermisch ertüchtigten Fassade 134
Abb. 35: Blick auf die Tragstruktur der ReUse Stahlträger 141
Abb. 36: Vorfertigung der Fertigteil Elemente im Werk 142
Abb. 37: Schnitt mit Darstellung der abgerissenen und neuen Elemente 143
Abb. 38: Schwarzplan maßstabslos 147
Abb. 39: Verkehrssituation maßstabslos 148
Abb. 40: Geschossigkeit und Einkommen maßstabslos 151
Abb. 41: Grün und Freizeit maßstabslos 152
Abb. 42: Historischer Lageplan von 1970 153
Abb. 43: Historischer Lageplan von 1975 154
Abb. 44: Historischer Lageplan von 1995 154
Abb. 45: Lageplan im Rahmen des wettbewerbs-bezogenen Entwurfs von 1974 155
Abb. 46: Aktueller Lageplan, Maßstabslos 156
Abb. 47: Detailzeichnung des aktuellen Sonnenschutzes 158
Abb. 48: Anschlussdetails Fertigteil-Fassade und Decken 159
Abb. 49: Statikplan zum Erdgeschoss 160
Abb. 50: Deckenanschluss der Fertigteil Stützen und Fertigteil Deckenelemente 161
Abb. 51: Blick in den ehemaligen Rohbau mit TGA Ausstattung im Obergeschoss 162
Abb. 52: Neue TGA Planung 2022 163
Abb. 53: Blick auf den typisch geprägten Innenausbau mit den roten Türen und den Systemtrennwänden 164
Abb. 54: Blick auf die verschiednen Bodenbeläge im Gebäude 165
Abb. 55: Blick durch eine Feuerschutztür in einen Flur hinein 166
Abb. 56: Blick auf die Innenraumausstattung in Form von Tischen und Stühlen 167
Abb. 57: Der Außenraum mit den verschiendenen Ebenen und dem hohen Versieglungsgrad 168
Abb. 58: Der Impressionen aus dem Außenraum: Unterstände und diverse Sitzmöglichkeiten 169
Abb. 59: Blick in einen Klassenraum mit geöffneter Decke 171
Abb. 60: Teststellen der Schadstoff-Untersuchung im Bereich des Fußboden-Belags 172
Abb. 61: Umfrage-Karten , die zur Befragung der Schüler- und Lehrerschaft genutzt wurden 187
Abb. 62: Überblick über die Entwicklung von Nutzerzahlen an den diversen Standorten der Berufsschule 189
Abb. 63: Blick in einen exemplarischen Technikraum 191
Abb. 64: Blick auf eine Mangelsituation: Wasserschaden infolge eines undichten Daches 193
Abb. 65: Mängel- und Potenzialplan EG maßstabslos 207
Abb. 66: Mängel- und Potenzialplan OG maßstabslos 209
Abb. 67: Mängel- und Potenzialplan UG maßstabslos 211
Abb. 68: Workflow zur Entwicklung von adaptiven, zirkulären Entwurfsszenarien 215
Abb. 69: Arbeitsmaske in Archicad und CPX Tools beim BIM-Manager 217
Abb. 70: Arbeitsmaske Concular bei der Verknüpfung von EPD Datensätzen 218
Abb. 71: Dashboard des Concular Tools 219
Abb. 72: Analysebereich zu den CPX-Ergebnissen 223
Abb. 73: Analysebereich zu den Massen 224

Abb. 74: Analysebereich zu den Massen 225
Abb. 75: Analysebereich zu den GWP Werten 226
Abb. 76: Analysebereich zu den Massen 228
Abb. 77: Excel Ausschnitt mit Drop-Down Menü im Pre Use Bereich 230
Abb. 78: Prinzipdarstellung der SUMMEWENN Funktion 231
Abb. 79: Excel Ausschnitt mit Drop-Down Menü im Post Use Bereich 232
Abb. 80: Prinzipdarstellung der Zuordnung der Komponenten Zuordnung im Pre Use 233
Abb. 81: Excel Ausschnitt mit Umwidmung zu den Stoffkreislauf-Angaben im Pre Use 234
Abb. 82: Prinzipdarstellung der Zuordnung im Pre Use gemäß der Stoffströme 235
Abb. 83: Excel Ausschnitt mit Umwidmung zu den Stoffkreislauf-Angaben im Pre Use 235
Abb. 84: Prinzipdarstellung der Zuordnung im Post Use gemäß der Stoffströme 236
Abb. 85: Prinzipdarstellung der Zuordnung der Komponenten Zuordnung im Post Use 237
Abb. 86: Abfallkategorien als Grundlage für Material-Zuordnung 240
Abb. 87: Selektion der GWP Gesamt Werte entsprechend der Abfallkategorien 241
Abb. 88: Zuordnung von Material, Abfallkategorie und Stoffstromangabe als Selektions Grundlage 242
Abb. 89: Exemplarischer Stapelgraph mit Einteilung nach Abfallkategorie und zusätzlichem Blick auf Erlöse 243
Abb. 90: Prinzip der Selektion der Savings durch die Wahl von einsparenden GWP Werten 244
Abb. 91: Exemplarische Stapelgraph mit tatsächlichen GWP Werten sowie aufgeschlüsselte Erlöse, die gespart werden 245
Abb. 92: Zuordnung von Material, Abfallkategorie und Stoffstromangabe als Selektions Grundlage 246
Abb. 93: Excel Eingabe Maske mit den verschiedenen Kosten-Analyseebenen 247
Abb. 94: Verwertungskosten- und - Erlöse gemäß dem Recylingatlas 248
Abb. 95: Exemplarische Stapelgraph mit den Verwertungskosten und Erlösen gemäß den Abfallkategorien 250
Abb. 96: Exemplarische Stapelgraph mit den Verwertungskosten und Erlösen gemäß den Stoffströmen 251
Abb. 97: Exemplarisches Kreisdiargramm mit den prozentualen Anteilen der Massen gemäß den Abfallkategorien 253
Abb. 98: Exemplarisches Kreisdiargramm mit den prozentualen Anteilen der Massen gemäß den Stoffstromangaben 254
Abb. 99: Lageplan zur Variante 0, maßstabslos 255
Abb. 100: Grundriss EG zur Variante 0, maßstabslos 256
Abb. 101: Grundriss OG zur Variante 0, maßstabslos 257
Abb. 102: Grundriss OG zur Variante 0, maßstabslos 258
Abb. 103: Schnitt, maßstabslos 258
Abb. 104: Ansicht Süd, maßstabslos 259
Abb. 105: Fassadenschnitt zur Variante 0, maßstabslos 260
Abb. 106: Perspektive auf den Eingangsbereich 266
Abb. 107: Lageplan zur Variante 1,maßstabslos 267
Abb. 108: Piktogramm Varianten Schwerpunkt 267
Abb. 109: Grundriss EG zur Variante 1, maßstabslos 268

Abb. 110: Grundriss OG zur Variante 1, maßstabslos 269
Abb. 111: Grundriss OG zur Variante 1, maßstabslos 270
Abb. 112: Schnitt, maßstabslos 270
Abb. 113: Ansicht Süd, maßstabslos 270
Abb. 114: Fassadenschnitt zur Variante 1, maßstabslos 272
Abb. 115: Perspektive auf den Eingangsbereich 288
Abb. 116: Lageplan zur Variante 2, maßstabslos 289
Abb. 117: Piktogramm Varianten Schwerpunkt 289
Abb. 118: Grundriss EG zur Variante 2, maßstabslos 290
Abb. 119: Grundriss OG zur Variante 2, maßstabslos 291
Abb. 120: Grundriss OG zur Variante 2, maßstabslos 292
Abb. 121: Schnitt, maßstabslos 292
Abb. 122: Ansicht Süd, maßstabslos 292
Abb. 123: Fassadenschnitt zur Variante 2, maßstabslos 296
Abb. 124: Perspektive auf den Eingangsbereich 312
Abb. 125: Lageplan zur Variante 2, maßstabslos 313
Abb. 127: Grundriss EG zur Variante 3, maßstabslos 128
Abb. 128: Grundriss OG zur Variante 3, maßstabslos 129
Abb. 129: Grundriss OG zur Variante 3, maßstabslos 316
Abb. 130: Schnitt, maßstabslos 316
Abb. 131: Ansicht Süd, maßstabslos 316
Abb. 132: Fassadenschnitt zur Variante 3, maßstabslos 318

TABELLEN

Tab. 1: Definition Pre Use Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung 46
Tab. 2: Definition Demontierbarkeit Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung 48
Tab. 3: Definition Wiederverwendung Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung 49
Tab. 4: Definition Trennbarkeit Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung 50
Tab. 5: Definition Faktor fv im Urban Mining Index 57
Tab. 6: Definition Faktor fw im Urban Mining Index 58
Tab. 7: Bewertungsmatrix zu den historischen und gegenwärtigen Beispielen 137
Tab. 8: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular 174
Tab. 9: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular 176
Tab. 10: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular 177
Tab. 11: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular 178
Tab. 12: Ermittelte U-Werte aus dem Sanierungs-Konzept 181
Tab. 13: Investitionsübersicht aus dem Sanierungskonzept 184
Tab. 13: Amortisations Annahmen aus dem Sanierungskonzept 186
Tab. 14: Massenbilanz 261
Tab. 15: CPX-Bilanz 262
Tab. 16: GWP-Bilanz 263
Tab. 17: Kosten-Bilanz 265
Tab. 18: Massen-Bilanz 277
Tab. 19: CPX-Bilanz 279
Tab. 20: GWP-Bilanz 283
Tab. 21: Kosten-Bilanz 286
Tab. 22: Massen-Bilanz 301
Tab. 22: CPX-Bilanz 303
Tab. 23: GWP-Bilanz 306
Tab. 24: Kosten-Bilanz 308
Tab. 25: Massen-Bilanz 325
Tab. 26: CPX-Bilanz 327
Tab. 27: GWP-Bilanz 331
Tab. 28: Kosten-Bilanz 333



Foto: Eigenes

1 EINLEITUNG

Bestandsgebäude sind mehr als gebaute Vergangenheit. Sie speichern Ressourcen, strukturieren ihre Umgebung und bieten Potenzial für eine zukunftsfähige Weiterentwicklung. Die Frage ist nicht mehr, ob sie erhalten werden sollen, sondern wie ihr Weiterbauen architektonisch, ökologisch und ökonomisch sinnvoll gestaltet werden kann. Dabei steht die Fähigkeit zur Transformation im Mittelpunkt: Räume sollen neue Funktionen aufnehmen, sich an wandelnde Anforderungen anpassen und im Kreislauf weiterverwendet werden können. Diese Arbeit untersucht, wie sich architektonische, materielle und kontextuelle Faktoren gemeinsam bewerten lassen, um die Zukunftsfähigkeit von Bestandsgebäuden zu sichern.

Einleitung

Bestandsgebäude sind Ausdruck vergangener Anforderungen, gestalterischer Prinzipien und baulicher Standards. Im Zuge gesellschaftlicher, ökologischer und funktionaler Veränderungen stellt sich zunehmend die Frage, wie bestehende Gebäude im Sinne einer zukunftsfähigen Architektur weiterentwickelt werden können. Dabei wird der Gebäudebestand nicht mehr ausschließlich als wirtschaftliches oder funktionales Hindernis wahrgenommen, sondern zunehmend als strukturelles und materielles Potenzial. Bereits Stewart Brand, auf dessen Theorien sich die vorliegende Arbeit unter anderem stützt, betonte:

„All buildings are predictions.
All predictions are wrong."

– Stewart Brand (Brand, 1997)

Diese Aussage verdeutlicht, dass Gebäude nie für alle zukünftigen Nutzungsszenarien ausgelegt sind, sondern sich im Laufe der Zeit verändern können und müssen. Sie bildet eine inhaltliche Brücke zum zentralen Thema dieser Arbeit: der Transformationsfähigkeit von Gebäuden im Sinne einer räumlichen Weiterentwicklung – etwa als transition of spaces. Gemeint ist die Fähigkeit von Räumen, sich an neue Anforderungen anzupassen, veränderte Nutzungen aufzunehmen und sich im Wechselspiel mit ihrer Umgebung weiterzuentwickeln.

Diese Transformationsfähigkeit ist im Kern adaptiv und beschreibt eine gestalterische wie funktionale Offenheit im Umgang mit baulichem Bestand. In Anbetracht globaler Umweltziele, begrenzter Ressourcen und wachsender Abfallmengen reicht ein ausschließlich adaptiver Zugang jedoch nicht aus. Eine zukunftsfähige Architektur muss darüber hinaus ressourcenschonend und materiell zirkulär gedacht werden.

In der gebauten Realität führt die Abwertung des Bestands jedoch häufig zu Abrissentscheidungen, wodurch potenziell wiederverwendbare Materialien ungenutzt im Abfallstrom enden. Bau- und Abbruchabfälle machen in

Deutschland etwa 54 % des gesamten Abfallaufkommens aus, was rund 216 Millionen Tonnen jährlich entspricht (Statistisches Bundesamt, 2024; Umweltbundesamt, 2024). Zwar werden etwa 90 % davon stofflich oder energetisch verwertet (EUWID Recycling, 2024), dennoch verbleiben signifikante Mengen in Deponien oder gehen als energetischer Verlust verloren.

Gerade vor diesem Hintergrund kann auch der Rückbau als Chance begriffen werden – vorausgesetzt, er wird nicht als destruktiver Abriss, sondern als gezielter, strukturierter Prozess verstanden. Strategien wie die selektive Demontage ermöglichen es, Bauteile sortenrein zu entnehmen, wiederzuverwenden und damit sowohl ökologische als auch gestalterische Potenziale nutzbar zu machen (Umweltbundesamt, 2015; Building Social Ecology, 2023).

Die Herausforderung liegt somit in einer doppelten Anforderung: Die Transformation von Bestandsgebäuden muss nicht nur architektonisch-adaptiv, sondern zugleich materiell-zirkulär erfolgen. Dies setzt voraus, dass Zirkularität nicht nur als konzeptioneller Anspruch formuliert, sondern anhand konkreter Indikatoren bewertet werden kann. Ohne nachvollziehbare Kriterien bleibt der Begriff unbestimmt. Zukunftsfähige Architektur erfordert daher eine systematische Messbarkeit von Anpassungsfähigkeit, Ressourceneffizienz und Wiederverwendungspotenzial.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit lautet:
Kann die zukunftsfähige Transformation von Bestandsgebäuden allein durch architektonische Adaption an veränderte Nutzungsansprüche und räumliche Kontexte gelingen, oder sind darüber hinaus messbare Kriterien erforderlich, um ihr Transformationspotenzial systematisch zu bewerten?

Ziel ist es, auf dieser Grundlage einen integrativen Bewertungsrahmen zu entwickeln, der gestalterische, materielle, ökologische und ökonomische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt und die Komplexität adaptiver sowie zirkulärer Planungsprozesse systematisch erfasst. Dieser wird exemplarisch auf das Felix-Fechenbach-Berufskolleg in

Detmold angewendet. Dabei werden nicht nur funktionale, räumliche, materielle und energetische Kriterien einbezogen, sondern auch die Perspektive der Nutzerinnen und Nutzer sowie die städtebauliche Einbindung des Gebäudes berücksichtigt.

Die theoretische und methodische Grundlage dieser Arbeit beruht auf verschiedenen Ansätzen. Der adaptive Reuse, wie ihn Liliane Wong beschreibt, versteht Gebäude als wandelbare Strukturen, die sich im Verlauf ihrer Nutzung verändern, erweitern und an neue Bedingungen anpassen lassen. Ergänzend dazu liefert Stewart Brands Theorie der Gebäudeschichten ein Modell zur funktionalen Gliederung baulicher Komponenten nach ihrer Lebensdauer, das eine differenzierte Betrachtung und Bewertung von Anpassungsfähigkeit ermöglicht. Im Rahmen der Circular Economy, wie sie durch die Ellen MacArthur Foundation geprägt wurde, wird diese Perspektive um die Dimension der Materialkreisläufe erweitert. Die Strategie Rethink fordert eine grundlegende Neuausrichtung bestehender Planungs- und Bauprozesse mit dem Ziel, Materialien dauerhaft im Kreislauf zu halten und Abfall zu vermeiden.

Vorgehen

Für die Bewertung von Materialkreisläufen und Rückbaupotenzialen werden zunächst zentrale Schwerpunkte analysiert, um daraus Synergien und Prozesse für die Entwurfsszenarien mit zirkulärer Bilanzierung abzuleiten.

Kapitel 2 bereitet grundlegende Begriffe, Einflussfaktoren und Forschungsergebnisse zur Kreislauffähigkeit systematisch auf. Als Grundlage dient unter anderem der Recyclingatlas, der Baustoffe hinsichtlich ihrer Rückgewinnbarkeit einordnet. Verbindungstechniken erhalten besonderes Augenmerk, da sie entscheidend für die Trenn- und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen sind. Ergänzend werden rechtliche Rahmenbedingungen wie das Kreislaufwirtschaftsgesetz und das Abfallrecht betrachtet. Für die quantitative Bewertung kommen digitale Werkzeuge wie Concular und der Urban Mining Index zum Einsatz. Lebenszyklusanalysen und Kostenbewertun-

gen ergänzen die ökologischen und wirtschaftlichen Betrachtungen. Zudem werden spezifische Anforderungen an den Schulbau berücksichtigt, um die Rahmenbedingungen für eine adaptive und zirkuläre Planung präzise zu bestimmen.

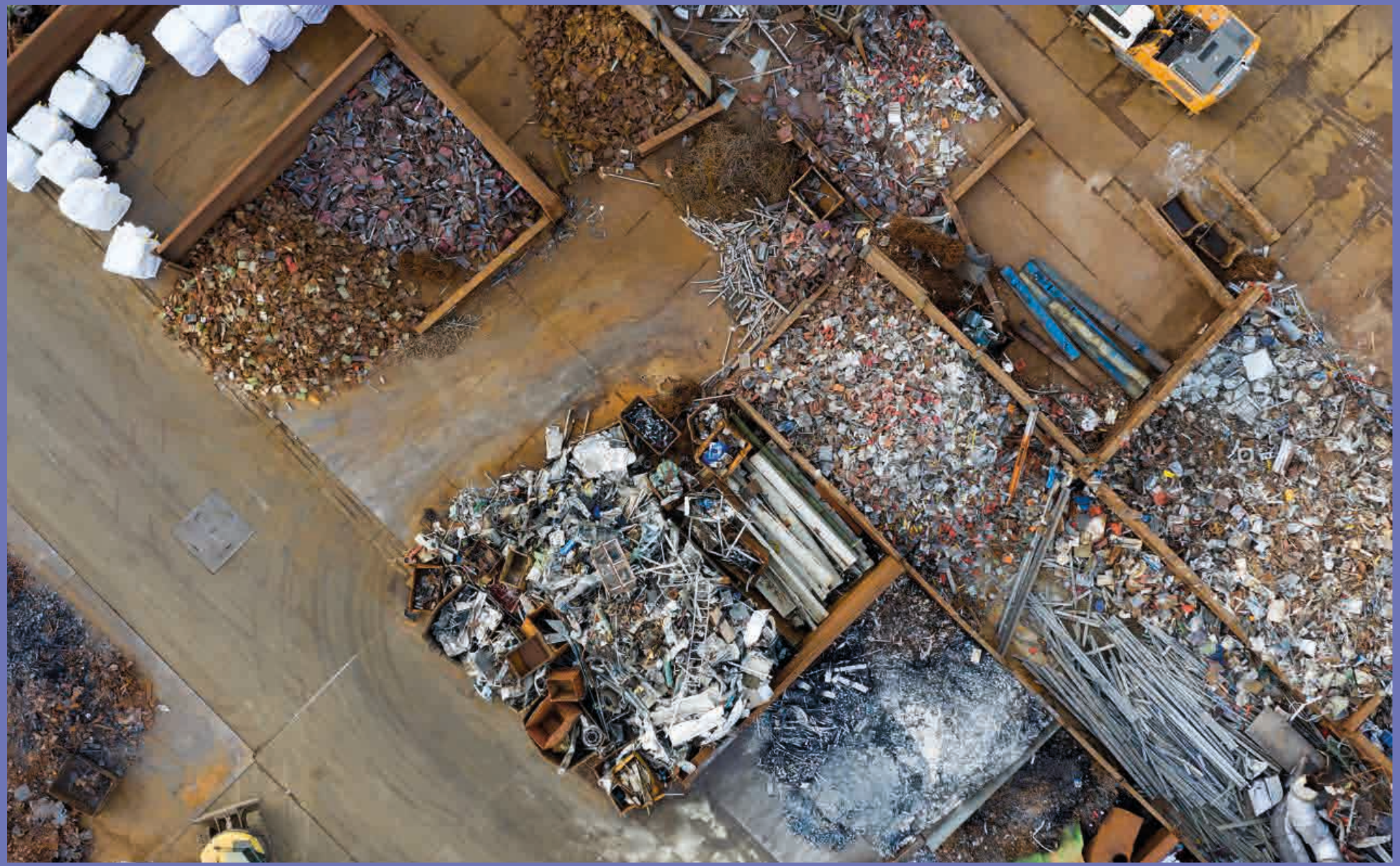
Die Methodik kombiniert qualitative und quantitative Verfahren. **Kapitel 3** analysiert historische und aktuelle Fallstudien mit beispielhaften adaptiven und zirkulären Strategien. Ziel ist es, übertragbare Prinzipien auf Material-, Konstruktions- und Architekturebene herauszuarbeiten und mit den Anforderungen des konkreten Bestandsprojekts abzugleichen. Ergänzend werden funktionale, gestalterische und strukturelle Anforderungen an zeitgemäße Schulbauten anhand geltender Richtlinien ausgewertet.

Die Analyse des Felix-Fechenbach-Berufskollegs in **Kapitel 4** erfolgt auf drei verknüpften Ebenen: städtebaulich, typologisch und materiell. Dabei werden Lage, Erschließung und Kontext, die innere Struktur und Nutzungsmöglichkeiten sowie Materialien, Konstruktionen, Schadstoffe, Schichtentrennung und Rückbaubarkeit untersucht. Grundlage bildet das Schichtenmodell nach Brand, ergänzt durch Schadstoffgutachten und Bauteilerfassungen.

Kapitel 5 widmet sich der Bewertung mithilfe digitaler Werkzeuge zur Analyse von Kreislauffähigkeit, Wiederverwendung und Emissionen. Diese werden kritisch auf ihre Anwendbarkeit im Bestand geprüft. Aufbauend darauf entsteht ein erweitertes Bewertungssystem, das alle relevanten Einflussgrößen integriert. Drei Entwurfsvarianten werden entwickelt und hinsichtlich Emissionen, Materialströmen, Rückbaukosten und räumlicher Flexibilität analysiert.

Kapitel 6 fasst die qualitativen und quantitativen Ergebnisse zusammen. Die Szenarien werden verglichen und ihre Übertragbarkeit auf andere Bestandsprojekte diskutiert. Abschließend werden Handlungsempfehlungen formuliert, wie adaptive und zirkuläre Strategien in zukünftige Planungsprozesse integriert werden können.

Foto: https://www.gebaeudeforum.de/wissen/nachhaltiges-bauen-und-sanieren/zirkulaeres-bauen/



2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die gegenwärtige Baupraxis steht vor der Herausforderung, vorhandene Strukturen nicht nur als vergängliche Nutzträger, sondern als dauerhafte Ressourcenträger zu begreifen. Theoretische Konzepte wie adaptive Wiederverwendung, die Schichtentrennung nach Brand oder Strategien der Circular Economy eröffnen neue Perspektiven auf das Planen und Bauen im Bestand. Dieses Kapitel systematisiert die Grundlagen zirkulären und adaptiven Bauens und legt damit das Fundament für eine integrative Bewertung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Wandelbarkeit, Ressourceneffizienz und langfristigen Gebrauchstauglichkeit.

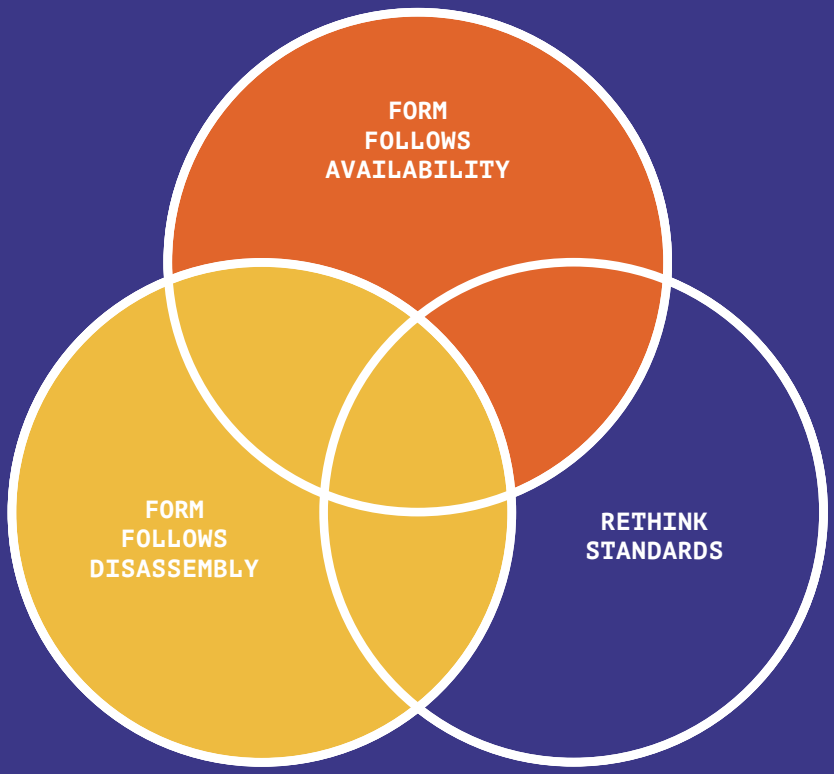


Abb. 1:
Prinzipdiagramm
zirkuläres Bauen

2.1 Adaptive Wiederverwendung: Space of Transition

Adaptive Wiederverwendung (Adaptive Reuse) konzentriert sich auf die Umnutzung bestehender Gebäude für neue Zwecke. Dabei geht es häufig um kreative Lösungen, um alte Bauten an moderne Anforderungen anzupassen. Die ursprüngliche Struktur bleibt dabei erhalten, erfährt jedoch eine funktionale Transformation. Ein Beispiel für adaptive Wiederverwendung ist die Umwandlung eines alten Bahnhofs in ein Museum, bei der das Gebäude eine völlig neue Nutzung erhält, ohne seinen architektonischen Charakter zu verlieren. Anstatt ein starres, endgültiges Design anzuwenden, wird das Gebäude so geplant, dass es sich an im Laufe der Zeit veränderte Anforderungen und Bedingungen anpassen kann. Ziel ist nicht ein fertiges und perfektes Gebäude, das für eine spezifische Nutzung erbaut wurde. Die sorgsame Transformation passt sich den Möglichkeiten des Vorhandenen an. Laut Adaptive Reuse von Liliane Wong

hat adaptive Wiederverwendung (adaptive reuse) ihren Ursprung in der pragmatischen Notwendigkeit der Ressourcenschonung, die bereits in der Frühgeschichte zu beobachten ist. Von der Wiederverwendung von Höhlen als Behausungen bis hin zur Transformation veralteter Industrieanlagen in moderne Kulturzentren – adaptive Architektur hat sich von einer wirtschaftlichen Notwendigkeit zu einer bewussten Strategie nachhaltiger Stadtentwicklung gewandelt (Wong, 2017).

Die Bauteile werden folglich in die Nutzungsplanung mit einbezogen. So wird aus dem bereits Bestehenden ein zieloffener Prozess der Nutzung, des Anpassens, des Reparierens, des Ersetzens und auch des Rückbauens entwickelt. Das Haus ist wie der ganze Lagerplatz roh und wandelbar. Beide bestehen sie aus vielfältigen, sich überlagernden Schichten und Geschichten. Mit dem Potenzial der Materialien und der Nutzerinnen und Nutzer, die sich davon inspirieren lassen, wird sich das Gebäude auch nach dem Bau weiterentwickeln. Ziel ist die Transformation zu einem dynamischen, responsiven System, dass das Bestandsgebäude zukunftsfähig macht (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

2.2 Zirkuläres Bauen: Circular Construction

Die Bauwirtschaft steht vor der Herausforderung, Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen drastisch zu reduzieren. Dennoch werden Gebäude oft mit einer begrenzten Lebensdauer geplant, was zu einem hohen Materialverlust und ineffizienten Nutzungskreisläufen führt. Vertrags- und Gewährleistungsregelungen verstärken diese Problematik, da Verantwortung meist nur für kurze Zeiträume übernommen wird. Dies fördert eine Wegwerfmentalität, anstatt auf langlebige, rückbaubare und wiederverwendbare Konstruktionen zu setzen.

Ein zirkuläres Bauen erfordert daher einen fundamentalen Wandel – weg von der linearen Nutzung hin zu einem geschlossenen Materialkreislauf. Dieser Ansatz geht über

reine Recyclingmaßnahmen hinaus und setzt bereits in der Planung an: Materialien sollten so gewählt und verbaut werden, dass sie langfristig im Kreislauf verbleiben oder sich regenerieren können. Schnell nachwachsende Rohstoffe und modular rückbaubare Systeme können hierbei eine Schlüsselrolle spielen.

Um diesen Wandel zu realisieren, ist es essenziell, den theoretischen Rahmen des zirkulären Bauens konsequent anzuwenden. Dies bedeutet, Bauwerke nicht nur als kurzfristige Lösungen zu betrachten, sondern als flexible Systeme, die sich über Generationen hinweg an veränderte Bedürfnisse anpassen können. Nur durch eine tiefgehende theoretische Auseinandersetzung mit Materialflüssen, Rückbaubarkeit und regenerativen Prinzipien lassen sich Konzepte entwickeln, die über konventionelle Nachhaltigkeitsstrategien hinausgehen und eine echte Transformation der Bauweise ermöglichen (Dall & Pereira, 2024).

Im Mittelpunkt der Circular Economy steht der Werterhalt von Rohstoffen, Materialien und Produkten sowie die Reduktion des Ressourcenverbrauchs. Angesichts des bestehenden und zunehmend dringlicher werdenden Ressourcenmangels ist es notwendig, das wirtschaftliche Wachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Dies soll durch Maßnahmen wie die Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz, ressourcenschonendes Design, Verlängerung der Produktlebensdauer, Rohstoffrückgewinnung und weitere Strategien erreicht werden (Circular Thinking in Standards, 2024).

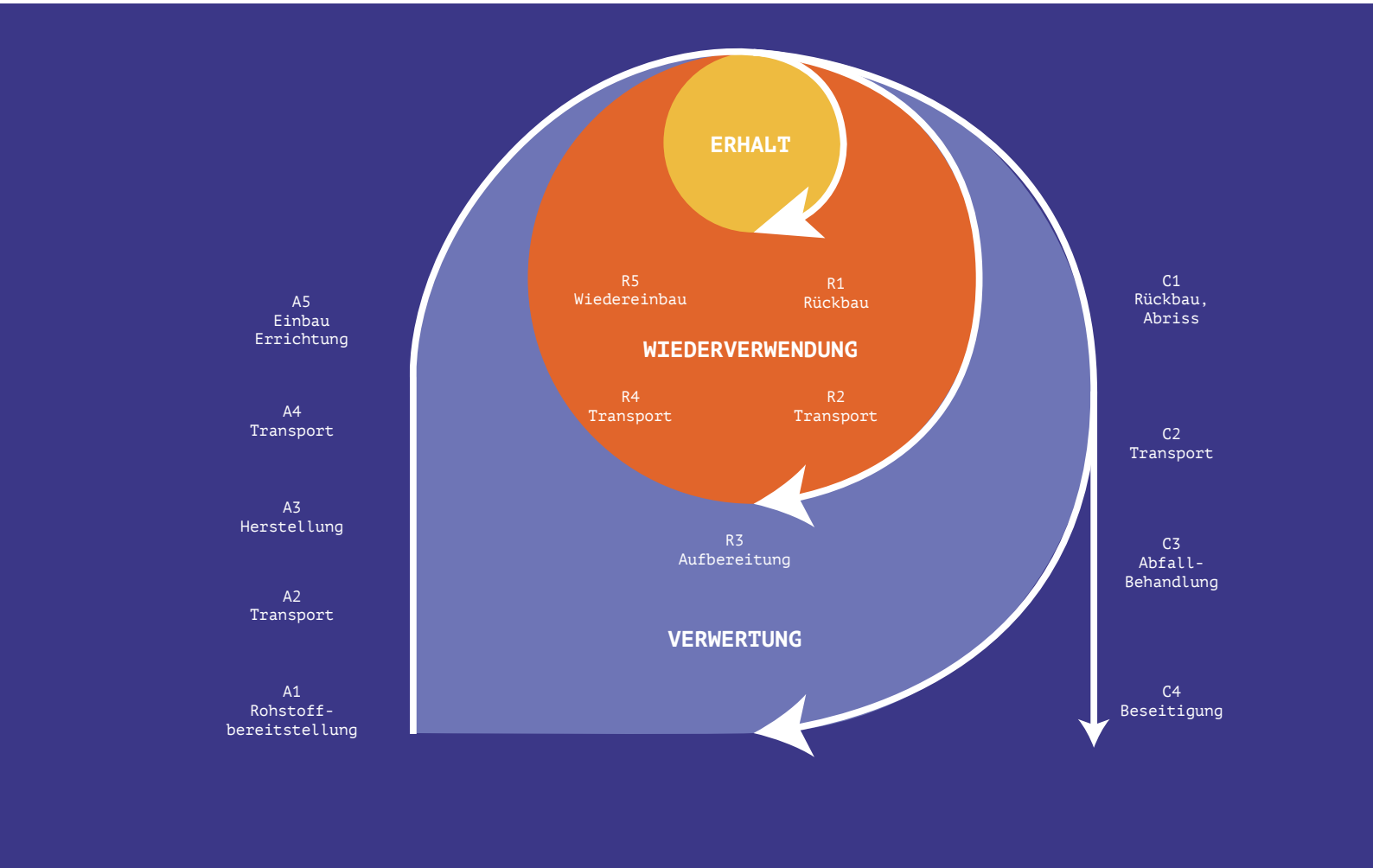
Es gibt drei Kernsätze, die das zirkuläre Bauen definieren: mit dem bauen, was da ist (form follows availability), eine spätere Wiederverwendung vorbereiten (form follows disassembly) und Erwartungen, Standards und Normen hinterfragen (rethinking standards).

2.2.1 Form follows availability

Das zirkuläre Bauen beruht auf dem Kreislaufprinzip, in dem Rohstoffe für Produkte, Materialien und Bauteile so geplant sind, dass sie eine voll ausgenutzte Lebensdauer erfahren. Das kann zum einen ein direkter Wieder-Einsatz des Produkts in gleicher Qualität. Zum anderen kann es auch die Wieder-Nutzung bedeuten, dass die im Gebäude eingesetzten Rohstoffe wieder einem technischen Kreislauf zugeführt werden oder biologisch abbaubar sind und so dem biologischen Kreislauf komplett zugeführt werden können. Die Vision des zirkulären Bauens, das auch die englische Ausdrucksweise „cradle-to-cradle“ im Kern wiedergibt, ist es möglichst lange ohne Qualitätsverlust die Lebensdauer der Bausubstanz in einem endlosen Kreislauf zu erhalten, sodass der Abfall in der Bauwirtschaft nachhaltig reduziert werden kann (Zirkuläres Bauen, 2025).

Die Nutzungszyklen, in denen sich die Bausubstanz be-

Abb. 2: Prinzipdiagramm form follwas availability



wegt, sollten möglichst kurz sein, damit die Lebensdauer vollends ausgenützt werden. So kann in der Abbildung 1 entnommen werden, dass je kürzer der Weg, desto höher stellt sein ein ökonomischer, ökologischer und kultureller Wert ein (von Busch, et al., 2025). Ein längerer Weg zu einem neuen Einsatz oder gar eine Vernichtung der im Bau eingesetzten Rohstoffe führt dazu, dass keine Wertschätzung erzielt wird. Es ist umso mehr erstrebenswert, einen Werterhalt der Bausubstanz anzustreben und so auf lange Sicht stets hoch zu halten.

Dafür sind bestimmte Geschäftsmodelle notwendig, um durch gezielte Kenntnisse in Demontage und Rückbau das Leben der gegenwärtigen und vor allem auch kommenden Bauteile zu verlängern. (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

2.2.2 Form follows disassembly

Darüber hinaus erfordert es beim zirkulären Bauen eine gewisse Weitsicht. So sollte nicht nur geplant werden, wie verwendete Materialien wieder in ein neues Bauwerk integriert werden können (pre - use). Genauso sollte schon im Planungsprozess eines neuen Gebäudes berücksichtigt werden, wie sich Bauteile zu einem späteren Zeitpunkt ausbauen lassen und wieder für eine Weiternutzung aufbereiten lassen (post - use). Dafür müssen Bauteile von Anfang an lösbar geplant werden, sodass sie sich für einen neuen Lebenszyklus sortenrein trennen lassen, oder sich Bauteile reparieren lassen (Zirkuläres Bauen, 2025).

Grundlage durch Stewart Brand

Die Grundlage für diese Denkweise ist schon vor Jahrzehnten gelegt worden. Um die unterschiedlichen Lebenszyklen innerhalb eines Gebäudes zu verstehen, entwickelte der britische Architekt Frank Duffy das Konzept der „shearing layers“ (wörtlich: schichtweise Veränderung). Seine Hauptidee lautete: „Ein Gebäude existiert nicht als einheitliches Ganzes. Ein gut gestaltetes Bauwerk setzt sich aus verschiedenen Schichten zusammen, die jeweils

eine unterschiedliche Lebensdauer haben.“ Im Jahr 1994 erweiterte der amerikanische Projektentwickler und Umweltaktivist Stewart Brand dieses Konzept und definierte sechs Schichten: Grundstück (site), Gebäudehülle (skin), Tragwerk (structure), technische Gebäudeausrüstung (services), Raumkonzept (space plan) und Innenausbau sowie Einrichtung (stuff) (Brand, 1997). Aus diesen sechs Schichten sollte jedes Gebäude bestehen und auch beim (Um-)Bau, ohne dass ihr Austausch oder eine Veränderung die allgemeine Lebensdauer beeinträchtigt. Darüber hinaus kann man auch noch weitergehen und sagen, dass jedes Bauteil eines Gebäudes entsprechend seiner Rolle und seines Lebenszyklus zu entwerfen sind. Diese Betrachtung ermöglicht eine nachhaltige, adaptive Planung, die den langfristigen Bestand und die flexible Nutzung von Gebäuden fördert (Brand, 1997).

Standort (Site) –
Lebensdauer: unendlich

Der Standort ist die einzige konstante Schicht eines Gebäudes. Geologische, klimatische und infrastrukturelle

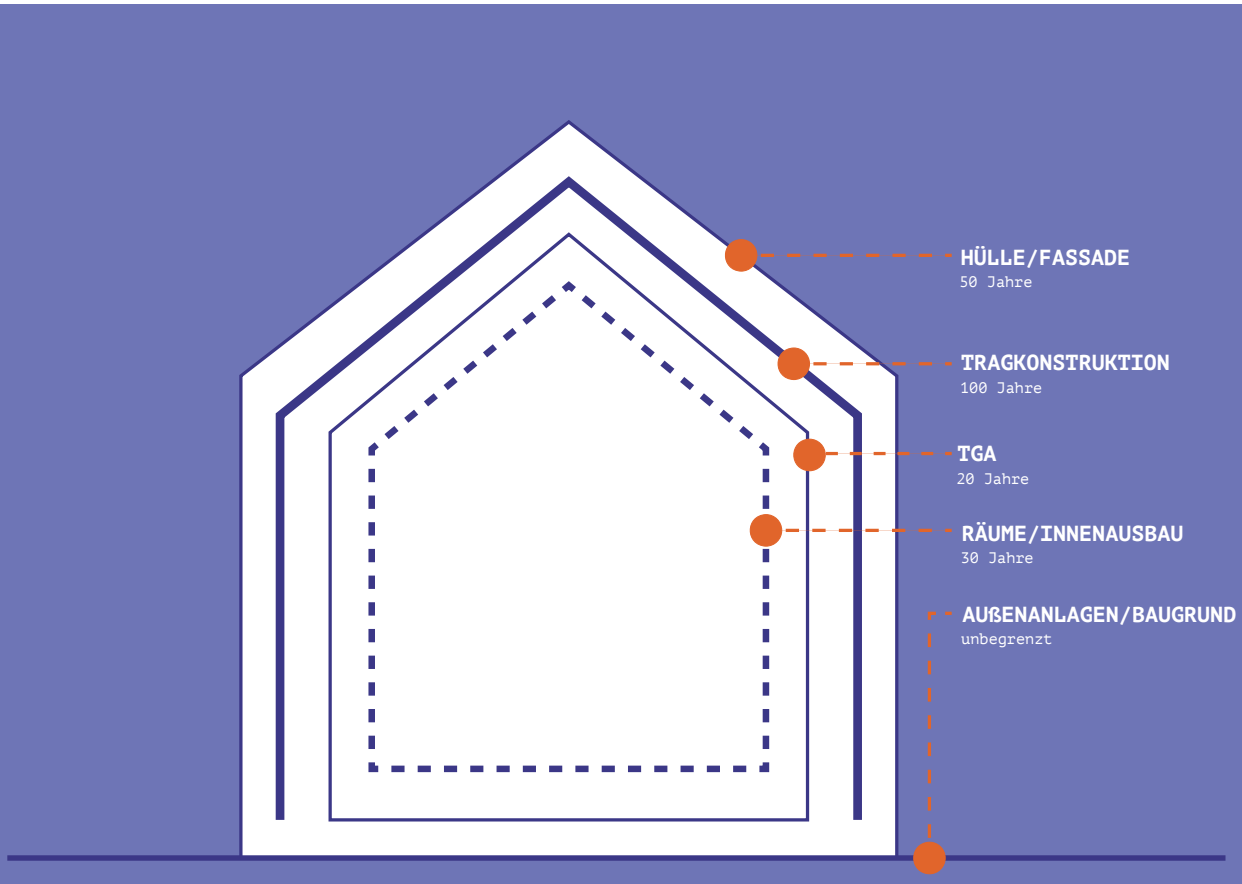


Abb. 3:
Prinzipdiagramm
form follwas
disassembly

Gegebenheiten bestimmen maßgeblich die Nutzungsmöglichkeiten und beeinflussen Faktoren wie Erschließung, Energiegewinnung und Umweltverträglichkeit. Eingriffe in diese Ebene sind kostenintensiv und oft unumkehrbar. Nachhaltige Planung berücksichtigt ökologische Aspekte wie Bodenqualität, Wassermanagement und Biodiversität, um langfristige Auswirkungen zu minimieren (Brand, 1997).

Tragende Struktur (Structure) –
Lebensdauer: 100 Jahre

Die Primärstruktur eines Gebäudes umfasst Fundamente, tragende Wände, Decken und Stützen. Sie stellt die stabilste und langlebigste bauliche Ebene dar, weshalb Änderungen meist aufwendig und kostenintensiv sind. Ein zukunftsorientiertes Tragwerk sollte auf einem flexiblen Raster basieren, um spätere Umnutzungen oder Erweiterungen zu erleichtern. Zudem kann eine vorfertigungsfreundliche Bauweise Bauzeiten reduzieren und Materialkreisläufe optimieren. Besonders im Geschossbau ermöglichen standardisierte Spannweiten und Geschosshöhen langfristige Anpassungsfähigkeit, ohne die tragende Struktur verändern zu müssen (Brand, 1997).

Gebäudehülle (Skin) –
Lebensdauer: 50 Jahre

Die Fassade, Fenster und Dächer bilden die Gebäudehülle, die physische und klimatische Trennung zwischen Innen- und Außenraum. Diese Schicht muss regelmäßig modernisiert werden, da sie starken Witterungseinflüssen unterliegt und sich funktionale, energetische sowie ästhetische Anforderungen stetig weiterentwickeln. Durch modulare, rückbaubare Fassadensysteme können Anpassungen erleichtert und Materialkreisläufe gefördert werden. Zudem kann die Gebäudehülle durch integrierte Energiegewinnung (z. B. Photovoltaik, Dachbegrünung) aktiv zur Nachhaltigkeit des Gebäudes beitragen (Brand, 1997).

Technische Gebäudeausrüstung (Services) –
Lebensdauer: 30 Jahre

Elektrik, Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs- und Klimatech-

nik unterliegen schnellen technologischen Fortschritten und haben eine begrenzte Lebensdauer. Um Wartung und Erneuerung zu erleichtern, sollten diese Systeme in einer leicht zugänglichen Installationsebene integriert sein. Eine gut geplante technische Infrastruktur reduziert graue Energie, vereinfacht den Austausch von Komponenten und steigert die Betriebseffizienz. Wo möglich, sollten passive Maßnahmen (z. B. natürliche Belüftung, Tageslichtnutzung) bevorzugt werden, um den Technikbedarf zu minimieren (Brand, 1997).

Raumaufteilung (Space Plan) –
Lebensdauer: 3–30 Jahre

Die Innenraumgestaltung umfasst nichttragende Wände, Bodenbeläge und Oberflächen. Da sich Nutzungsanforderungen häufig ändern, sollte diese Schicht besonders flexibel sein. Durch modulare Trennwände, multifunktionale Räume und anpassbare Möblierung lassen sich Gebäude langfristig effizient nutzen. Der Einsatz von reversiblen Verbindungstechniken und kreislauffähigen Materialien erleichtert Umbauten und Wiederverwendung. Eine durchdachte Raumstruktur kann zudem positive Effekte auf das Raumklima und die Aufenthaltsqualität haben (Brand, 1997).

Ausstattung (Stuff) –
Lebensdauer: 30 Jahre

Die mobilen Elemente eines Gebäudes, wie Möbel, technische Geräte und Dekoration, unterliegen dem schnellsten Wandel. Diese Ebene bietet jedoch auch großes Potenzial für nachhaltige Innovationen. Produktservice-Modelle, bei denen Gegenstände gemietet statt gekauft werden, verlängern die Nutzung und reduzieren Abfall. Zudem sollten Produkte hinsichtlich Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit ausgewählt werden. Auch digitale Lösungen wie Smart-Building-Technologien können helfen, Ressourcenverbrauch zu optimieren und Nutzungseffizienz zu steigern (Brand, 1997).

Fazit

Das Schichtenmodell nach Stewart Brand verdeutlicht, dass eine nachhaltige und zukunftsfähige Architektur

auf die unterschiedlichen Lebenszyklen der Bauteile eingehen muss. Durch die Trennung in langlebige Primärstrukturen und flexibel anpassbare Sekundärschichten entsteht ein dynamisches System, das sich den wandelnden Nutzungsanforderungen anpassen kann. Dies fördert nicht nur die Ressourcenschonung, sondern auch die langfristige Werterhaltung von Gebäuden (Brand, 1997).

Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, ist eine frühzeitige und interdisziplinäre Zusammenarbeit essenziell. Hersteller, Handwerksbetriebe und Fachplaner müssen gemeinsam Lösungen entwickeln, die Demontage, Wiederverwendbarkeit und Materialkreisläufe ermöglichen. Nur durch solche integrativen Planungsprozesse lassen sich die hohen Anforderungen an Tragwerk, Bauphysik sowie Brand- und Schallschutz langfristig erfüllen (Zirkuläres Bauen, 2025).

Ein zentraler Aspekt dabei ist die Entflechtung der verschiedenen Schichten eines Gebäudes. Indem die einzelnen Ebenen unabhängig voneinander geplant und montiert werden, lassen sie sich bei Bedarf leichter austauschen oder anpassen. Demontierbare Konstruktionen spielen hierbei eine Schlüsselrolle: Sie ermöglichen es, Bauteile ohne großen Materialverlust zu entfernen, wiederzuverwenden oder in den Kreislauf zurückzuführen (Brand, 1997).

Darüber hinaus sind neue Geschäftsmodelle notwendig, die die Rücknahme und Wiederverwertung von Bauteilen wirtschaftlich attraktiv machen. Wenn Planungsprozesse und Materialkreisläufe nahtlos ineinandergreifen, können Gebäude als wandelbare Ressourcenspeicher fungieren und einen entscheidenden Beitrag zum zirkulären Bauen leisten. Die Betrachtung dieser Aspekte eröffnet innovative Perspektiven für eine nachhaltige Bauwirtschaft und zeigt, dass Gebäude nicht nur als statische Objekte, sondern als lebendige, anpassbare Systeme verstanden werden sollten (Zirkuläres Bauen, 2025).

2.2.3 Rethink standards

Das zirkuläre Bauen steht noch am Anfang eines umfassenden Transformationsprozesses insbesondere im Hinblick auf Normen, Standards und gesellschaftliche Leitbilder. Um Bauteile auf ungewohnte Weise in den Lebenszyklus zurückzuführen, braucht es mehr als technologische Innovationen. Gefordert ist ein tiefgreifendes Umdenken in der Baupraxis, in den rechtlichen Grundlagen und im kulturellen Verständnis von Komfort, Qualität und Wert. Viele bestehende Bauteile und Materialien entsprechen nicht den „Allgemein anerkannten Regeln der Technik“ und das nicht, weil sie unbrauchbar wären, sondern weil sie nicht in das lineare, perfektionistische Idealbild aktueller Normierungssysteme passen. Hier setzt die Rethink-Strategie an, was eine der zentralen Maßnahmen innerhalb des sogenannten R-Frameworks, das unter anderem durch die Europäische Kommission im Kontext der Circular Economy entwickelt und priorisiert wurde. Rethink gilt dabei als besonders wirksam, da es auf der Ebene des Systemdesigns, der Nutzungskonzepte und des Selbstverständnisses ansetzt und damit die Grundlage für alle weiteren R-Strategien wie Reuse, Repair oder Recycle bildet (Circular Thinking in Standards, 2024).

Rethink bedeutet konkret: Wir müssen Standards und Komfortansprüche hinterfragen, denn nicht alles muss neu, perfekt oder genormt sein. Vielmehr geht es um die Entwicklung eines neuen Bedarfsverständnisses im Sinne der Suffizienz. (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung , 2024). Wie viel Fläche, wie viel Technik, wie viel Energie ist tatsächlich notwendig? Und was kann ein Gebäude leisten rein funktional, ästhetisch, technisch unter Einhaltung minimaler Ressourcenströme? Diese Fragen verlangen nach neuen Kriterien der Qualität und des Bauens insgesamt. Alte Kategorien wie „Müll“ und „Abfall“ müssen überdacht, Ressourcen neu bewertet werden. Suffizienz ist dabei nicht nur eine Frage des Verzichts, sondern auch eine des bewussten Gestaltens und Wertschätzens. So schreibt das UNEP: „Ohne einen Verhaltenswandel aller kann Transformation nicht gelingen“

(Understanding circularity, 2025).

Diese Transformation betrifft jedoch nicht nur das Denken, sondern auch das Recht. Insbesondere das Bauordnungsrecht und das Abfallrecht müssen an die Anforderungen des zirkulären Bauens angepasst werden. Während das Versetzen von Bauteilen innerhalb eines Gebäudes in der Regel unproblematisch ist, solange keine tragenden oder sicherheitsrelevanten Elemente betroffen sind, gestaltet sich die Wiederverwendung von Bauteilen aus anderen Gebäuden wesentlich komplexer. Hier sind Prüfungen in Bezug auf Standsicherheit, Brandschutz und Schadstofffreiheit zwingend erforderlich. Dazu wird besonders in dem Kapitel zur Wirtschaftlichkeit von Kreislaufwirtschaft untersucht, welche Potenziale in der Anpassung der Abfallregeln zu erkennen und entsprechend in den entwickelten Nutzungsszenarien anzuwenden sind (Circular Thinking in Standards, 2024).

Auch im Bereich der DIN-Normen zeigt sich der Reformbedarf deutlich: Normen orientieren sich oft an idealtypischen, linearen Bauweisen und schreiben detaillierte Ausführungsformen vor, die der Idee von Wiederverwendung, Modularität und Adaptierbarkeit zuwiderlaufen. Zwar sind DIN-Normen nicht automatisch rechtlich bindend, sie entfalten aber durch Gesetzesverweise, Vertragsinhalte und ihre Rolle als „anerkannte Regel der Technik“ eine starke faktische Verbindlichkeit insbesondere in Bezug auf Haftungsfragen. Hier bedarf es eines gezielten Umbaus: Normen und Standards müssen an die Prinzipien der Circular Economy angepasst werden (Circular Thinking in Standards, 2024).

Dieser Bedarf wurde auch von institutioneller Seite erkannt: 2023 haben das Deutsche Institut für Normung (DIN), DKE und VDI eine Normungsroadmap zur Circular Economy veröffentlicht, die insbesondere für den Bausektor umfangreiche Defizite und Handlungsfelder benennt. Die Roadmap betont die Rolle von Standards als strukturelle Voraussetzung für Kreislaufprozesse. Dabei kann die Normung die Umsetzung der verschiedenen R-Strategienentscheidend unterstützen, sei es durch



Abb. 4:
Prinzipdiagramm
rethink standards

Anforderungen an Demontierbarkeit, Schadstofffreiheit, digitale Materialpässe oder modulare Bauweisen. Im R-Framework, welches insgesamt neun Strategien umfasst, darunter Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle und Recover, ist Rethink ganz oben angesiedelt. Je niedriger die Zahl hinter dem „R“, desto effektiver ist die Strategie im Sinne zirkulären Wirtschaftens. Das zeigt: Die Überprüfung und bewusste Neuausrichtung unserer Planungs- und Bauprozesse stellt keinen nachgelagerten Zusatzschritt dar, sondern bildet den zentralen Ausgangspunkt jeder zukunftsfähigen Circular-Economy-Strategie im Bauwesen. Dabei geht es weniger darum, bestehende DIN-Normen im Einzelnen zu hinterfragen, sondern vielmehr darum, die grundlegenden Denk- und Handlungsräume des Planens selbst neu zu definieren. Das zirkuläre Bauen eröffnet ein erweitertes Planungsfeld, in dem nicht nur Bauweisen und Materialien, sondern auch Nutzungsszenarien, Lebenszyklen und Rückbauoptionen von Anfang an mitgedacht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden genau diese übergeordneten Handlungsebenen in den

Entwurfsprozess einbezogen, um die Potenziale und Herausforderungen eines planungsbasierten Umdenkens im Sinne der Circular Economy sichtbar und weiterentwickelbar zu machen (Circular Thinking in Standards, 2024).

Normen und Standards übernehmen hierbei eine vermittelnde Funktion zwischen Innovation und Praxis: Sie schaffen ein gemeinsames Verständnis, regulieren technische Schnittstellen, sichern Qualität und ermöglichen die breite Anwendung zirkulärer Prinzipien. Gleichzeitig haben sie eine gesellschaftsformende Rolle, indem sie durch ihre Definitionsmacht darüber mitentscheiden, was als „bautechnisch zulässig", als „verwendbar" oder gar als „wertvoll" gilt. Nur durch eine bewusste Neuausrichtung dieser normativen Grundlagen kann zirkuläres Bauen zur Regel werden – nicht zur Ausnahme.

2.3 Messbarkeit von Kreislaufpotenzialen: Aktueller Stand der Forschung

Vor wenigen Jahrhunderten war Bauen ressourcenschonend, langlebig und stark von natürlichen, lokal verfügbaren Materialien geprägt. Gebäude hielten über Generationen, und ihre Bestandteile wurden bei Bedarf weiterverwendet, ohne große Umweltbelastungen zu verursachen. Heute jedoch führt das enorme Bauvolumen, vor allem in Städten, zu kürzeren Gebäudelebensdauern und immer mehr Abfall. Moderne Baustoffe sind oft komplex, schwer recycelbar und teils gesundheitsgefährdend. Die Verantwortung für Entsorgung und Umweltfolgen liegt derzeit allein bei den Eigentümern. Dies ist vor allem auf das bereits vorgestellte Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zurückzuführen. Die im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geforderte Verantwortung der Hersteller für ihre Produkte sowie deren Haftung wird bislang nicht wirksam umgesetzt: Die Allgemeinheit bleibt weiterhin ungeschützt vor der gemeinsamen Tragung der Umweltfolgen und der Entsorgungskosten. Bereits in der Planung entscheidet sich, ob eine Immobilie am Ende ihres Lebens Wertstoff oder Sondermüll ist.

Ein wesentlicher Anteil am Werterhalt einer Immobilie – unabhängig von ihrem Standort – hängt davon ab, ob die verwendeten Materialien hochwertig und sortenrein recycelbar sind. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Ausarbeitung mit verschiedenen Nutzungsszenarien diese Problematik mit verschiedenen Ebenen der Kreislaufbewertung am Beispiel des Felix-Fechenbach-Berufskollegs untersucht werden. Ziel ist mit Anwendung dieser nachfolgenden Tools und Analysemöglichkeiten, den Wert der Immobile für seine neue Lebenszeit in der Umnutzung bestimmen und im Vorfeld vorgeben zu können.

2.3.1 Kreislaufstrategien im Bauwesen

Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft im Bauwesen verfolgt das Ziel, Ressourcen zu schonen und Abfälle möglichst zu vermeiden. Hierfür lassen sich vier grundlegende Strategien unterscheiden, die sich nach ihrer Wirksamkeit ordnen lassen: An erster Stelle steht der Verzicht auf den Einsatz von Materialien, gefolgt von der Wiederverwendung, der Wiederverwertung (Recycling) sowie mit kleinen Einschränkungen der Weiterverwendung und Weiterverwertung. Andere Entsorgungsformen, wie die Verbrennung fossiler Materialien oder die Deponierung, wie sie etwa in der EU-Abfallrahmenrichtlinie aufgeführt sind, tragen hingegen nicht zur Ressourcenschonung bei und gelten daher nicht als nachhaltig.

Die Strategie der Wiederverwendung zielt darauf ab, Bauteile oder Materialien nach ihrer Nutzung erneut in gleicher Funktion einzusetzen, was idealerweise ohne aufwendige Umformung passiert. In vielen europäischen Ländern entstehen derzeit Plattformen und Initiativen, die sich auf den Handel mit gebrauchten Bauteilen spezialisieren, etwa die Bauteilbörse Restado in Deutschland oder Harvestmap in Österreich. Wird ein Bauteil beispielsweise nach Reinigung wieder als Mauerstein verbaut, spricht man von Wiederverwendung oder Re-Use. In der Praxis sind solche Ansätze jedoch noch selten, da sie mit technischen Herausforderungen, Qualitätsfragen und

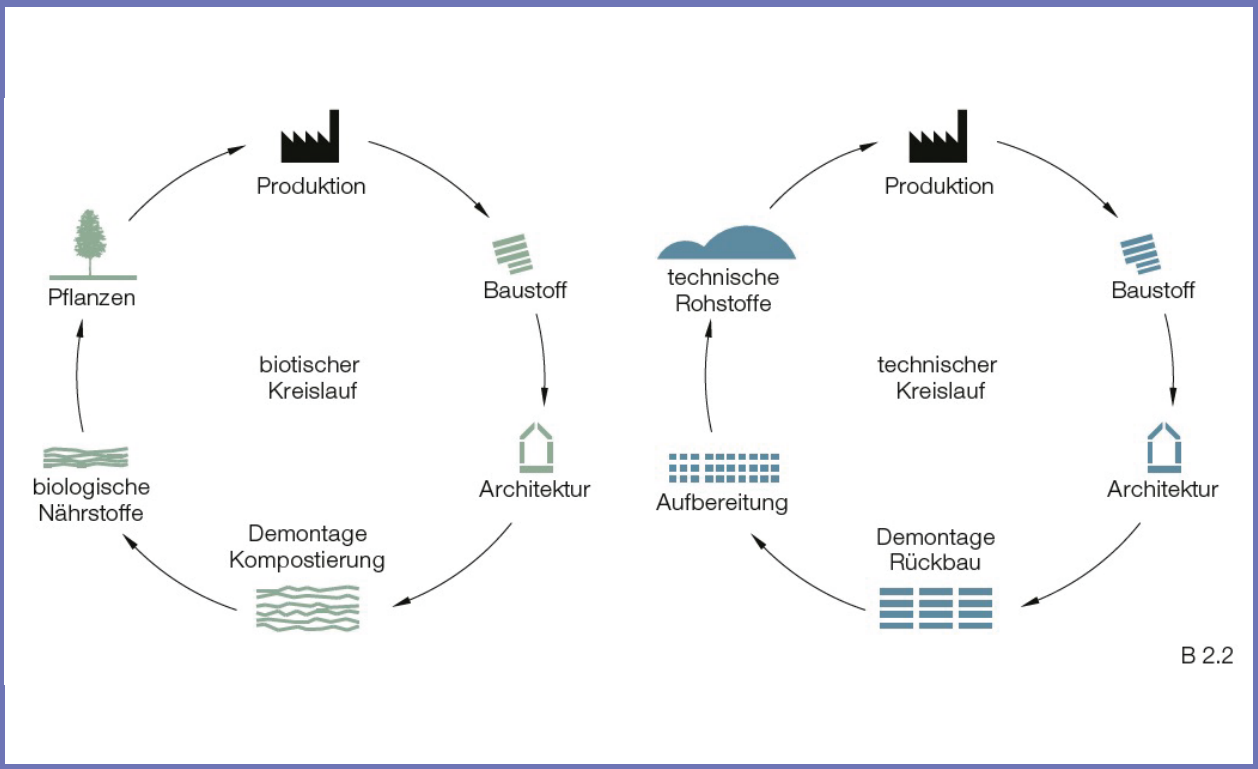


Abb. 5:
Prinzipdiagramm
Recyclingwege

mangelnder Akzeptanz bei Planenden und Bauherren verbunden sind. Hinzu kommt, dass die Wiederverwendung ein Umdenken im Planungsprozess erfordert: Nicht mehr das Wunschmaterial bestimmt den Entwurf, sondern vorhandene Bauteile geben den Rahmen vor , was ein Prinzip ist, das als »Urban Mining Design« bekannt ist (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Ist die ursprüngliche Funktion eines Bauteils aufgrund von Abnutzung oder Qualitätsverlust nicht mehr möglich, spricht man von Weiterverwendung (Re Use). Ein Beispiel ist die Nutzung alter Fassadenklinker als Bodenbelag für Gartenwege. Das Material wird dabei einer neuen, niedrigwertigeren Nutzung zugeführt. Es handelt sich dabei um einen Vorgang, der als Downcycling bezeichnet wird, da der Ressourcenwert sinkt. Neben der Wieder- und Weiterverwendung spielt die Verwertung gebrauchter Baustoffe eine zentrale Rolle. Dabei wird die ursprüngliche Form des Produkts aufgelöst. Die Wiederverwertung (Recycling) beschreibt Prozesse, bei denen Materialien technisch aufbereitet und anschließend in

derselben Qualitätsstufe erneut eingesetzt werden. So kann beispielsweise ein alter Stahlträger eingeschmolzen und zu einem neuen Träger verarbeitet werden, ohne dass die Materialqualität verloren geht. Ein typisches Beispiel für einen funktionierenden technischen Kreislauf ist die Wiederverwertung von Aluminiumprofilen aus Fenstern: Diese werden nach dem Rückbau sortenrein getrennt, eingeschmolzen und wieder zu neuen Fensterrahmen verarbeitet und das mit nahezu identischer Qualität und deutlich geringerem Energieaufwand im Vergleich zur Neugewinnung aus Bauxit. Im Gegensatz dazu steht die Weiterverwertung, bei der das Material zwar erneut genutzt wird, jedoch nur unter Verlust seiner ursprünglichen Qualität. So entsteht beispielsweise aus Flachglas ein minderwertigeres Profilglasprodukt. Diese Form des Downcyclings kann bei nachwachsenden Rohstoffen sinnvoll sein, führt jedoch meist zu einem Ressourcenverlust und zusätzlichem Abfallaufkommen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Die Grafik zeigt anschaulich die beiden zentralen Materialkreisläufe im Bauwesen: den biotischen und den technischen Kreislauf. Im biotischen Kreislauf werden Materialien wie Holz oder andere pflanzliche Stoffe nach ihrer Nutzung kompostiert und als biologische Nährstoffe wieder der Natur zugeführt. Aus diesen entstehen neue Pflanzen, die wiederum zu Baustoffen verarbeitet werden – ein nahezu geschlossener, natürlicher Kreislauf. Der technische Kreislauf hingegen beschreibt die industrielle Wiederverwertung nicht-organischer Materialien. Nach dem Rückbau werden Baustoffe wie Metalle oder Kunststoffe aufbereitet und erneut als Rohstoffe in die Produktion zurückgeführt. Der Kreislauf gilt als geschlossen, wenn die Qualität der recycelten Materialien der ursprünglichen entspricht und der Materialverlust minimal bleibt. In beiden Kreisläufen ist Sortenreinheit eine entscheidende Voraussetzung für hochwertiges Recycling. Störstoffe wie Flammschutzmittel, Verklebungen oder Beschichtungen können das Recycling erheblich erschweren oder sogar unmöglich machen. Daher ist eine durchdachte Materialwahl und Planung bereits in der Entwurfsphase unerlässlich, um eine zukunftsfähige

Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu ermöglichen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

2.3.2 Kreislauf- und Lebenszyklusbewertungstools

Der zirkuläre Planungs- und Bauprozess erfordert einen höheren Aufwand im Vergleich zum traditionellen, linearen Planungsansatz, da er mehrere zusätzliche Schritte und eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachbereichen umfasst. Im traditionellen Planungsablauf sind die Leistungsphasen der HOAI klar strukturiert und folgen einem linearen Ablauf, der in der Regel eine einmalige Abarbeitung der Aufgaben in aufeinanderfolgender Reihenfolge vorsieht. Im Gegensatz dazu ist der zirkuläre Planungsprozess iterativ und verlangt eine kontinuierliche Rückkopplung zwischen den verschiedenen Phasen und eine ständige Anpassung der Planung.

2.3.2.1 Concular

Concular ist ein digitales Kreislaufbewertungsprogramm, das Unternehmen aus der Immobilien- und Bauwirtschaft dabei unterstützt, ihre Gebäude und Projekte zukunftsfähig im Sinne der Circular Economy zu gestalten. Entstanden ist Concular aus der Beobachtung, dass es bislang an einem durchgängigen digitalen System fehlte, das die Wiederverwendung von Baumaterialien strukturiert ermöglicht und den Lebenszyklus von Gebäuden ganzheitlich abbildet. Gerade im Bauwesen war die Rückführung von Materialien in den Kreislauf lange Zeit fragmentiert, nicht digital erfasst und dadurch in der Praxis schwer umsetzbar. Gleichzeitig steigen regulatorische Anforderungen beispielsweise durch die EU-Taxonomie oder nationale Nachhaltigkeitsziele und der wirtschaftliche Druck, Immobilien nicht nur nachhaltiger, sondern auch resilienter und langfristig werthaltig zu entwickeln. Concular reagiert auf diese Herausforderungen, indem es Planung, Bau, Rückbau und Wiederverwendung in einer digitalen Infrastruktur zusammenführt und so ein praktikables Werkzeug für zirkuläres Bauen bereitstellt (Concular, 2025).

Eine zentrale Rolle in der Arbeit mit Concular spielt das digitale Gebäudemodell, insbesondere das Building Information Modeling (BIM). Da BIM-Modelle mittlerweile in vielen Planungsbüros und Architekturabteilungen Standard sind, kann Concular auf bestehende digitale Strukturen zurückgreifen, um Materialien präzise zu erfassen und deren Kreislauffähigkeit zu bewerten. Schon in der Entwurfsphase lassen sich zirkuläre Materialien gezielt auswählen und modellieren. Diese Daten fließen direkt in die Concular-Plattform ein, wo digitale Materialpässe generiert werden, die den gesamten Lebenszyklus eines Bauteils dokumentieren. Auch in der Bauphase fungiert das BIM-Modell als zentrale Datenquelle, um Re-use-Materialien zu koordinieren und den Materialfluss effizient zu dokumentieren. Gleichzeitig werden durch die Integration von Ökobilanzierungswerkzeugen Echtzeitdaten zu CO_2-Emissionen und Ressourcenschonung verfügbar, die zur Nachhaltigkeitsbewertung und für Zertifizierungen wie DGNB, LEED oder BREEAM genutzt werden können (Digitaler Gebäuderessourcenpass, 2025).

Um all dies zu ermöglichen, benötigt Concular eine Vielzahl an Daten, darunter digitale Gebäudemodelle, detaillierte Informationen über die verwendeten Materialien, Angaben zu Zustand, Alter und Schadstofffreiheit der Bauteile sowie Umweltproduktdeklarationen (EPDs). Ergänzend werden standortbezogene Informationen wie Transportwege oder Rückbaupotenziale berücksichtigt. All diese Daten fließen in einen digitalen Prozess, der nicht nur Rückbauszenarien, sondern auch künftige Nutzungsmöglichkeiten transparent abbildet (Concular für Planende, 2025).

Bewertung der Kreislauffähigkeit in Concular

Der Circularity Performance Index (CPX) von Concular ist ein Bewertungsinstrument, das die Zirkularität einzelner Bauteile sowie ganzer Gebäude quantifiziert. Ziel des CPX ist es, aufzuzeigen, wie gut Materialien und Konstruktionen nach der Nutzung wieder in den Ressourcenkreislauf zurückgeführt werden können – also wie hoch ihr Wiederverwendungs- und Recyclingpotenzial ist. Der

Index bildet damit sowohl die technische als auch wirtschaftlich realistische Rückführbarkeit von Baustoffen am Ende der Gebäudelebensdauer ab und unterstützt Planende frühzeitig bei zirkulären Entscheidungen (Concular, 2025).

Der CPX wird künftig als Bestandteil des digitalen Gebäuderessourcenpasses verwendet und kann sowohl für Neubauten als auch für Bestandsgebäude eingesetzt werden. Grundlage der Bewertung sind zwei Lebenszyklusphasen: die Materialherkunft (Pre-Use) und die Verwertbarkeit nach der Nutzung (Post-Use). In die Bewertung fließt ein, ob ein Bauteil aus wiederverwendeten Elementen besteht, recycelte Materialien enthält, einfach zu demontieren und sortenrein zu trennen ist oder gut aufbereitbar bleibt.

Je höher der Anteil solcher zirkulär geeigneten Materialien in einem Bauteil ist, desto besser fällt der CPX aus. Der Index basiert auf einer umfassenden Datenbank generischer Bauteile, kann aber projektbezogen angepasst werden. Als Planungswerkzeug dient der CPX derzeit rein informativ ohne formale Dokumentationspflicht und ergänzt weitere Nachhaltigkeitskennzahlen wie Gesundheitsindikatoren, ESG-Bewertungen oder Restwertanalysen.

Der Circularity Performance Index (CPX) bewertet die Zirkularität eines Bauteils auf Grundlage zweier Phasen: der Herkunft des Materials (Pre Use) und dessen zukünftiger Verwertbarkeit (Post Use). Beide Phasen fließen mit jeweils 50 % in die Gesamtbewertung eines Bauteils ein.

$$\mathrm{PX}_i = 0{,}5 \cdot \mathrm{ECPX}_{\mathrm{Pre}} + 0{,}5 \cdot \mathrm{ECPX}_{]}$$

Die Berechnungsformel lautet:
Der Pre-Use-Wert (ECPXPre) ergibt sich direkt aus dem Herkunftswert des Materials, auch MO (Materials Origin) genannt. Dieser beschreibt, ob ein Bauteil aus Primärmaterial, Rezyklaten oder wiederverwendeten Elementen besteht.

Der Post-Use-Wert (ECPXPost) setzt sich aus vier Einzelfaktoren zusammen:

RS (Resource Separability): Trennbarkeit
RD (Resource Dismantling): Demontierbarkeit
RC (Recycling): Recyclingfähigkeit
RU (Reuse): Wiederverwendung

Die Gewichtung innerhalb des Post-Use-Werts wurde bewusst festgelegt, um die Wiederverwendung zu priorisieren: Wiederverwendung zählt 60 %, Recycling 40 %. Die genaue Formel lautet:

$$\mathrm{ECPX}_{\mathrm{Post}} = 0{,}2 \cdot \mathrm{RS} + 0{,}3 \cdot \mathrm{RD} + 0{,}2 \cdot \mathrm{RC} + 0{,}3 \cdot \mathrm{RU}$$

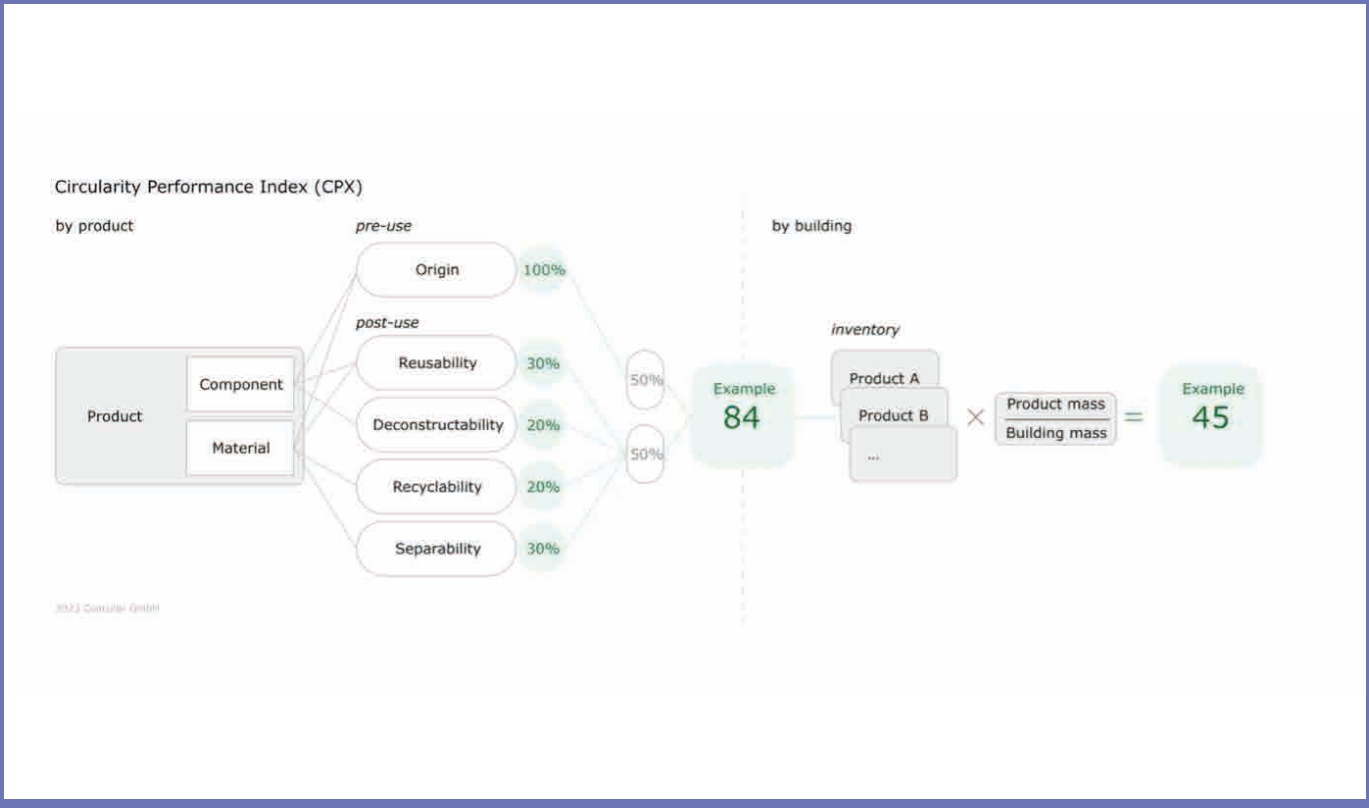
Der CPX-Wert eines gesamten Gebäudes ergibt sich schließlich aus dem durchschnittlich gewichteten Wert aller enthaltenen Bauteile. Dabei wird der Beitrag jedes einzelnen Elements entsprechend seiner Masse im Verhältnis zur Gesamtmasse des Gebäudes berücksichtigt. So spiegelt der CPX nicht nur die Qualität einzelner Bauteile, sondern auch deren tatsächliche Relevanz für die Zirkularität des gesamten Bauwerks wider (Concular, 2025).

Sowohl das DGNB-System als auch der Circularity Performance Index (CPX) von Concular bewerten die Rückbaubarkeit und Wiederverwertbarkeit von Bauteilen anhand ähnlicher Kriterien. Die Demontierbarkeit beschreibt dabei, ob ein Bauteil ohne Beschädigung rückgebaut werden kann, während die Trennbarkeit sich auf die Möglichkeit bezieht, Materialverbunde sauber zu separieren – etwa durch Schrauben, Klemmen oder auch chemische Verfahren. In der DGNB-Bewertung wird die Wiederverwendung (Reuse) über sogenannte Nutzungsäquivalente beurteilt, wobei direkte Wiederverwendung mit 100 % bewertet wird. Das Recycling unterscheidet zwischen stofflicher und energetischer Verwertung, wobei die Qualität der Verwertung (z. B. Downcycling) mit einfließt. Concular legt den Schwerpunkt auf Wiederverwendung:

Im CPX fließt Reuse mit 60 % in die Bewertung ein, Recycling mit 40 %. Dabei werden Aufwand und Qualität der Maßnahmen differenziert bewertet und das von losen bis verklebten Verbindungen. Insgesamt bilden Trennbarkeit und Demontierbarkeit die Basis für Reuse und Recycling, wobei Wiederverwendung aus ökologischer Sicht als vorrangig gilt. Beide Systeme bieten damit eine klare Orientierung für eine zirkuläre Planung und Rückbaupraxis (Concular, 2025).

Concular hat hinter den einzelnen Kriterien Entscheidungswerte hinterlegt, die im Folgenden vorgestellt werden. Dabei wird unterschieden, in welcher Art und Weise eine Demontage aussehen kann oder die Trennbarkeit unterschieden wird. Es ist als Entscheidungshilfe anzusehen, die nicht nur zur Bestimmung der Kreislauffähigkeit der Konstruktion benötigt wird, sondern auch schon im Entwurfsprozess mitgedacht und bekannt sein sollte. Diese Kategorisierung wird unteranderem von Concular eng in Zusammenarbeit mit dem DGNB erarbeitet, um eine breite Funktionsfähigkeit des Zirkularitätstools zu

Abb. 6: Zirkuläre Kalkulation in Concular



erhalten und es auch für Zertifizierungen im großen Stil anwenden zu können (Concular, 2025).

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) ist eine Organisation, die sich der Förderung nachhaltigen Bauens und Betreibens von Gebäuden widmet. Sie hat ein umfassendes Zertifizierungssystem entwickelt, das ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte von Bauprojekten bewertet. Concular ist ein deutsches Unternehmen, das sich auf zirkuläres Bauen spezialisiert hat, insbesondere auf die Wiederverwendung von Baumaterialien durch digitale Materialpässe und Rückbauplanung. Beide Organisationen arbeiten eng zusammen, um Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu fördern. Conculars Ansätze und Tools fließen dabei zunehmend in die DGNB-Zertifizierung ein, etwa durch gemeinsame Leitfäden oder die Integration von zirkulären Prinzipien in Bewertungsstandards. Interessant ist, dass sowohl die DGNB als auch Concular ähnliche Bewertungsmaßstäbe für die Rückbaufähigkeit und Wiederverwendung von Bauteilen verwenden. Im offiziellen DGNB-Bewertungssystem, beispielsweise im Kriterium TEC1.6 „Rückbau und Recyclingfreundlichkeit“, werden Materialien anhand von vier Qualitätsstufen (QS) von QS4 für direkte Wiederverwendung (100 %) bis QS0 für nicht verwertbare Materialien (0 %) eingestuft. Eine Zwischenstufe, etwa für Downcycling, existiert nicht und diese Formen werden pauschal unter QS2 (stoffliches Recycling mit Funktionsverlust) zusammengefasst. Auch Concular orientiert sich an diesen Kategorien, sodass beide Systeme vergleichbare Bewertungsgrundlagen für die Kreislauffähigkeit schaffen. Diese gemeinsame Systematik erleichtert es, zirkuläres Bauen praktikabel in Planungs- und Rückbauprozesse zu integrieren. Diese werden nun betrachtet und auch vergleichend mit den DGNB-Stufen untersucht (DGNB System - Kriterienkatalog Sanierung, 2021).

Pre Use

In der Pre-Use-Phase wird die Materialherkunft eines Bauteils auf materieller Ebene bewertet. Eine Ausnahme bilden gleichwertig wiederverwendete Bauteile, bei de-

nen die Bewertung unabhängig von der Materialzusammensetzung erfolgt. Die Qualifizierung erfolgt anhand von drei Hauptkategorien: Wiederverwendung, Verwendung von Rezyklaten und Nutzung von Primärrohstoffen. Bauteile, die direkt wiederverwendet werden, erzielen die Höchstbewertung mit 100 Punkten. Wird das Bauteil teilweise aus Rezyklaten hergestellt, liegt die Bewertung bei 75 Punkten bei einem Rezyklatanteil zwischen 50 und 100 % bzw. bei 50 Punkten bei einem Anteil unter 50 %. Kommt ausschließlich Primärmaterial zum Einsatz, wird das Bauteil mit 0 Punkten bewertet. Diese Einschätzung spiegelt die ökologische Wertigkeit des Materialursprungs im Kontext der Kreislaufwirtschaft wider (Notion Site Concular, 2025).

Informationen zu den einzelnen Materialien und eine Entscheidungshilfe zur Bestimmung der Rezyklatanteile gibt es nicht. Es ist daher erforderlich Recherchen bei Herstellern zu Materialien und Bauteilen anzustellen, um eine fundierte wissenschaftlichen Aussage treffen zu können. Eine Hilfestellung ist zu dem der aktuelle Recyclingatlas, der im Kapitel zu den Recyclingpotenzialen von Baustoffen genau dargestellt werden (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Concular – Beschreibung	**Concular – Punkte**	**DGNB – QS-Stufe**	**Erläuterung**
Wiederverwendetes Bauteil	100 Punkte	QS4 – Wiederverwendung (100 %)	Direkte Wiederverwendung ohne Substanzverlust
Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50–100 %	75 Punkte	QS3 – Wiederverwendung mit höherem Aufwand (75 %)	Wiederverwendung nach intensiverer Aufbereitung
Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50 %	50 Punkte	QS2 – Recycling (75 %)	Stoffliche Verwertung mit Funktionsverlust (Downcycling)
Bauteil aus Primärrohstoffen	0 Punkte	QS0 – Nicht verwertbar (0 %)	Kein Kreislaufpotenzial, thermische Verwertung oder Deponierung

Tab. 1: Definition Pre Use Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung

Post Use

In der Post-Use-Phase wird die konstruktive und materielle Wiederverwertbarkeit des Bauteils betrachtet. Dabei fließen vier zentrale Faktoren in die Bewertung ein: Trennbarkeit, Demontierbarkeit, Recyclingfähigkeit und Wiederverwendbarkeit. Diese Faktoren werden gewichtet, um ihre Relevanz für die Kreislauffähigkeit realistisch abzubilden. Wie bereits erläutert erhält der Aspekt der Wiederverwendung dabei eine höhere Gewichtung von 60 %, da er die direkte Weiterverwendung vorhandener Ressourcen fördert, während das Recycling mit 40 % in die Bewertung eingeht. Ziel dieser Differenzierung ist es, Materialien zu bevorzugen, die ohne oder mit geringem Aufwand erneut eingesetzt werden können, anstatt sie aufwendig recyceln zu müssen (Notion Site Concular, 2025).

Demontierbarkeit

Die Demontierbarkeit eines Bauteils beschreibt dessen Rückbaufähigkeit – also, wie leicht es aus dem bestehenden Gebäude entfernt werden kann, ohne dabei beschädigt zu werden. Entscheidende Kriterien sind dabei die Art der Verbindung sowie das benötigte Werkzeug. Je einfacher der Rückbau, desto höher die Bewertung. Bauteile, die lediglich lose verbaut sind und ohne Hilfsmittel entfernt werden können, erhalten die Höchstpunktzahl von 100 Punkten. Verschraubte Verbindungen werden mit 85 Punkten bewertet, da sie relativ unkompliziert gelöst werden können. Muss hingegen maschinelles Werkzeug eingesetzt werden, sinkt die Bewertung auf 50 Punkte. Erfolgt der Rückbau nur mit schwerem Gerät, etwa bei stark fixierten oder vergossenen Bauteilen, liegt die Punktzahl bei 15. Ist eine schadensfreie Demontage gar nicht möglich, wird der Wert mit 0 Punkten angesetzt (Notion Site Concular, 2025).

Wiederverwendung

Die Wiederverwendung eines Bauteils wird anhand des Aufwands bewertet, der erforderlich ist, um es für den erneuten Einsatz in einem anderen Bauvorhaben vorzubereiten. Je geringer der notwendige Aufwand, desto höher fällt die Bewertung aus. Bauteile, die ohne jegliche Nach-

Qualifizierung Demontage	Quantifizierung Demontage	DGNB Äquivalent	Definitionen	
lose	100 Punkte	optimiert	Fügen ohne feste Verbindung, meist durch Eigengewicht und Formschluss	Auflegen / Aufsetzen / Schichten (DIN 8593-1)
Durchsteckmontage	85 Punkte	optimiert	Ein Teil wird in ein anderes geschoben, z. B. Bolzen durch eine Bohrung	Ineinanderschieben (DIN 8593-1)
an- oder aufgeschraubt	85 Punkte	optimiert	Verbindung durch selbsthemmendes Gewinde	Schrauben (DIN 8593-3)
an- oder aufgedübelt	50 Punkte	verbessert	Verbindung durch kraftschlüssiges Einpressen eines dehnbaren Teils	An- und Einpressen (DIN 8593-3)
an- oder aufgenagelt	50 Punkte	verbessert	Fügen durch Einschlagen von Nägeln ins Material	Nageln / Einschlagen (DIN 8593-3)
Klemmbefestigung	50 Punkte	standard	Verbindung durch Klemmkraft, oft elastische oder plastische Verformung	Klemmen (DIN 8593-3)
angemörtelt	15 Punkte	standard	Füllen von Mörtel oder vergleichbarem Stoff in Hohlräume zur Befestigung	Einfüllen (DIN 8593-2)
an- oder aufgeschweißt	15 Punkte	eingeschränkt	Verbindung durch Stoffschluss mittels Schweißtechnik	Umformen – gemeinsames Verschweißen (DIN 8580)
verklebt	15 Punkte	eingeschränkt	Verbindung durch Klebstoffe mit formschlüssiger Aushärtung	Verkleben (DIN 8593-3)
eingeschlagen	0 Punkte	problematisch	Verbindung durch Einschlagen mit Übermaß, z. B. Bolzen oder Haken	Fügen durch Presspassung / Einschlagen
einbetoniert	0 Punkte	problematisch	Bauteil wird beim Betonieren fixiert bzw. eingegossen	Einfüllen (DIN 8593-2)
kraftschlüssig verbunden	0 Punkte	problematisch	Verbindung durch Vorspannung, z. B. Keile oder Klemmsysteme	Verspannen (DIN 8593-3)

Tab. 2: Definition Demontierbarkeit Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung

bearbeitung direkt wieder eingebaut werden können, erreichen den Höchstwert von 100 Punkten. Muss das Bauteil lediglich gereinigt oder einfach aufbereitet werden, etwa durch einen neuen Anstrich oder Verpackung, werden 90 Punkte vergeben. Erfordert die Wiederverwendung eine aufwändigere Instandsetzung, etwa das Ersetzen von Kleinteilen oder Anpassungsarbeiten, liegt die Bewertung bei 80 Punkten. Muss das Bauteil professionell überarbeitet oder geprüft werden, beispielsweise durch ein Herstellerunternehmen oder mittels Zertifizierung, wird es mit 70 Punkten bewertet. Ist die Wiederverwendung jedoch wirtschaftlich nicht sinnvoll oder technisch nicht umsetzbar, erhält das Bauteil 0 Punkte (Notion Site Concular, 2025).

Qualifizierung Wiederverwendung	Quantifizierung Wiederverwendung	DGNB Äquivalent	DGNB Bezeichnung
Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	100 Punkte	QS4 – Wiederverwendung (100 %)	Keine Bearbeitung notwendig, volle Kreislauffähigkeit, z. B. Versetzen von Mauersteinen.
Einfache Aufbereitung notwendig (z.B. Anstrich)	90 Punkte	QS4 – Wiederverwendung (95 %)	Zulässig mit geringer, nicht substanzverändernder Nachbearbeitung.
Zeitintensive Aufbereitung notwendig (z.B. Ersatzteile)	80 Punkte	QS3 – Wiederverwendung (75 %)	Zeit- und kostenintensivere Bearbeitung, dennoch vollständige stoffliche Wiederverwendung.
Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	70 Punkte	QS2 – Recycling (75 %)	Übergang zu Recycling: stoffliche Nutzung bleibt, ursprüngliche Funktion nicht erhalten.
Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0 Punkte	QS0 – Nicht verwertbar (0 %)	Keine wirtschaftlich tragbare Rückführung in den Kreislauf; meist thermische Verwertung.

Tab. 3: Definition Wiederverwendung Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung

Trennbarkeit

Die Trennbarkeit eines Bauteils beschreibt, wie gut sich die darin enthaltenen Materialien voneinander separieren lassen, um sie gezielt wiederzuverwenden oder zu recyceln. In die Bewertung fließen sowohl der technische als auch der wirtschaftliche Aufwand ein und ebenso wie das eingesetzte Trennverfahren. Bauteile, deren Materialien sich ohne den Einsatz von Werkzeug voneinander lösen lassen, erhalten die Höchstbewertung von 100 Punkten. Ist zur Trennung lediglich Handwerkzeug nötig, liegt die Punktzahl bei 85. Erfolgt die Trennung durch maschinelle Prozesse in einer industriellen Umgebung, werden 75 Punkte vergeben. Müssen die Materialien jedoch chemisch getrennt werden, etwa durch Lösungsmittel oder spezielle Verfahren, sinkt der Wert deutlich auf 30 Punkte. Ist eine saubere Trennung der Stoffe gar nicht möglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar, wird die Trennbarkeit mit 0 Punkten bewertet (Notion Site Concular, 2025).

Qualifizierung Trennbarkeit	Quantifizierung Trennbarkeit	DGNB Einstufung
Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	100 Punkte	Entspricht QS2: „Rückbaufreundliche Baukonstruktion“, bei der keine sortenreine Trennung nötig ist.
Maschinelle Trennung mit tragbaren Geräten (Handwerkzeug)	85 Punkte	DGNB betont zerstörungsfreien Rückbau und einfache Lösbarkeit – QS2-konform.
Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	75 Punkte	Möglich unter QS2, wenn sortenrein und zerstörungsfrei – technikgestützt aber etabliert.
Chemische Trennung möglich	30 Punkte	Wird von der DGNB nicht als recyclingfreundlich eingestuft; keine Anerkennung als QS2.
Verlustfreie Trennung unmöglich	0 Punkte	Entspricht QS0 nach DGNB – keine Verwertung möglich, ggf. Deponierung erforderlich.

Tab. 4: Definition Trennbarkeit Auswahl für die Zirkularitäts-bewertung

Recycling

Die Recyclingfähigkeit eines Bauteils wird auf Basis aktueller Daten gemäß den EPD Dokumenten und ihren Recyclingquoten sowie der Art und Qualität des Recyclingprozesses bewertet. Dabei wird unterschieden, ob ein Material stofflich, thermisch oder lediglich durch Downcycling wiederverwertet werden kann. Besonders positiv bewertet werden Materialien, die vollständig stofflich verwertet oder sogar kompostiert werden können, da sie so den natürlichen Kohlenstoffkreislauf unterstützen. Solche Materialien erreichen die Höchstpunktzahl von 100 Punkten. Je geringer die Verwertungsqualität oder je höher der Aufwand, desto niedriger fällt die Bewertung

aus (Notion Site Concular, 2025).

Schadstoffbelastung

Dieser Faktor ist nur für Bestandsgebäude relevant. Enthält ein Bauteil gesundheitsgefährdende Substanzen, die auf sogenannten „roten Listen“ geführt werden, wird es vollständig von der Zirkularitätsbewertung ausgeschlossen. Damit soll sichergestellt werden, dass nur Materialien, die heutigen gesundheitlichen Standards entsprechen, als zirkulär bewertet werden können. Neubauten sind in der Regel von dieser Einschränkung nicht betroffen, da bei ihrer Planung und Ausführung meist bereits auf schadstofffreie Materialien geachtet wird. In Concular würde man bei dem Bestandsgebäude das jeweilige schadstoffbelastete Bauteil mit „Entfernt“ definieren. Eine konkretere Kategorisierung ist nicht möglich (Notion Site Concular, 2025).

Es ist vorteilhaft, dass Concular mit dem DGNB zusammenarbeitet und sich so ein Verständnis über die Qualität der Rückbauzustände einstellen kann. Dadurch, dass eine Zuordnung zu den Stoffströmen wie Wiederverwendung und Wiederverwertung erfolgt, lässt sich der Aufwand eindeutiger nachvollziehen, als nur über die Demontage Bescheid zu wissen. Diese Begrifflichkeiten werden in den nachfolgenden Kapiteln beleuchtet, um wissenschaftliche Werte und Erkenntnisse aus der Praxis mit einzubeziehen. Eine Kategorisierung ohne Vergleichswerte von Bauteilen, Materialien und Konstruktionen im Planungsprozess nicht möglich (Notion Site Concular, 2025).

Insgesamt gesehen ist Conular ein Beispiel dafür, wie digitale Werkzeuge helfen können, die Transformation hin zu einer ressourcenschonenden und wirtschaftlich tragfähigen Baukultur konkret umzusetzen.

2.3.2.2 Urban-Mining-Index (UMI)

Der Urban Mining Index (UMI) ist ein Bewertungsinstrument zur Messung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden. Er wurde entwickelt, um das Rückbau- und Wiederverwertungspotenzial von Baukonstruktionen systematisch und quantifizierbar zu erfassen. Im Zentrum steht dabei die Frage, welche Materialien in einem Gebäude vorhanden sind, wie gut sie rückgewonnen werden können und wie sie sich im Sinne der Kreislaufwirtschaft weiterverwenden oder verwerten lassen. Der UMI unterscheidet dabei zwischen verschiedenen Formen der stofflichen Rückführung, von der direkten Wiederverwendung über hochwertiges Recycling bis hin zu Downcycling und energetischer Verwertung. Besonders hervorgehoben wird zudem der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, die im Index gesondert bilanziert werden (Rosen, 2021).

Die Berechnung des Urban Mining Index erfolgt auf Basis detaillierter Massenbilanzen von Materialien in einem Gebäude. Diese werden sowohl im Pre-Use-Zustand (also bei der Errichtung) als auch im Post-Use-Zustand (nach dem Rückbau) erfasst. In die Bewertung fließen zwei zentrale Parameter ein: der Faktor Wert (fv), der die ökonomische Attraktivität eines Stoffes beschreibt, und der Faktor Arbeit (f_w), der den Rückbauaufwand widerspiegelt. Das Zusammenspiel dieser Faktoren ergibt eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber, wie gut ein Material wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden kann. Die Ergebnisse werden in zwei Kernindikatoren ausgewiesen: dem Closed-Loop-Potenzial (CLP) und dem Loop-Potenzial (LP), die zusammen die zirkuläre Qualität eines Bauwerks quantifizieren (Rosen, 2021).

Die folgende vergleichende Bewertung setzt sich kritisch mit dem Bilanzierungsansatz des UMI auseinander und stellt ihn der systemischen Herangehensweise von Concular gegenüber. Dabei wird untersucht, wie beide Verfahren die Kreislauffähigkeit von Bauprodukten einschätzen, welche methodischen Parallelen und Unterschiede bestehen und inwiefern der UMI möglicherweise eine ergänzende Perspektive auf zirkuläres Bauen bietet.

Das Kreislaufpotenzial im Urban Mining Index (UMI) wird auf Ebene einzelner Bauteile bewertet und in zwei Kreisdiagrammen, den sogenannten „Loops“, veranschaulicht. Der erste Loop bezieht sich auf die Phase vor der Nutzung eines Gebäudes (Pre-Use) und zeigt den Anteil an Rezyklaten oder nachwachsenden Rohstoffen, die in der Herstellung der Konstruktion verwendet wurden. Dabei spielt die Art der Fügung , wie beispielsweise die Bauteile miteinander verbunden sind, keine Rolle. Entscheidend ist allein, wie viel Anteil an erneuerbaren oder sekundären Rohstoffen die Materialien enthalten. Dieser Anteil wird als Material Recycling Content (MRC) bezeichnet. Dieser MCR wird auch im folgenden Kapitel zur Recyclingfähigkeit von Baustoffen hinzugezogen und untersucht (Rosen, 2021).

Der zweite Loop betrachtet den Zeitpunkt nach der Nutzung (Post-Use) und bewertet, in welchem Maße die verwendeten Materialien am Ende der Lebensdauer des Gebäudes wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Hierbei werden sowohl die Fügung der Bauteile als auch die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus berücksichtigt. Für jedes Bauteil wird analysiert, welche Wertstoffe beim Rückbau entstehen, wie aufwendig deren Rückgewinnung ist und welchen ökonomischen Wert sie haben (Rosen, 2021).

Das **Closed-Loop-Potenzial (CLP)** im Rahmen des Urban Mining Index (UMI) beschreibt dabei die Fähigkeit eines Produkts oder Bauteils, am Anfang und Ende seines Lebenszyklus in einen geschlossenen Materialkreislauf zurückgeführt zu werden. Das maximale theoretische CLP beträgt 200 %, wenn sowohl vor der Nutzung (Pre-Use) als auch nach der Nutzung (Post-Use) alle Materialien vollständig wiederverwendbar, recycelbar oder erneuerbar sind. Es konzentriert sich auf die stoffliche Rückführung ohne Qualitätsverlust und bildet somit das Idealbild einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft ab (Rosen, 2021).

Gesamtformel:

$$\mathrm{CLP} = \mathrm{CLP}_{\text{pre-use}} + \mathrm{CLP}_{\text{post-use}}$$

Pre Use Komponenten:

$$\mathrm{CLP}_{\text{pre-use}} = RU + RC + RN$$

RU: Anteil wiederverwendeter Bauteile/Bauprodukte (*Reuse*)

RC: Anteil wiederverwerteter Materialien (*Recycling*)

RN: Anteil nachwachsender Rohstoffe (*Renewable*)

Post Use Komponenten:

$$\mathrm{CLP}_{\text{post-use}} = ru + rc + d_{ccr} + en_{cr}$$

ru: Anteil wiederverwendbarer Bauteile (*reusable*)

rc: Anteil recycelbarer Wertstoffe

d_{ccr}: Anteil stofflich verwertbarer Bestandteile aus zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen

en_{cr}: Anteil energetisch verwertbarer Bestandteile aus zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen

Zerlegung der Post Use Faktoren

$$\mathrm{CLP}_{\text{post-use}} = ru + rc + d_{ccr} + en_{cr}$$

ru: Anteil wiederverwendbarer Bauteile (*reusable*)

rc: Anteil recycelbarer Wertstoffe

d_{ccr}: Anteil stofflich verwertbarer Bestandteile aus zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen

en_{cr}: Anteil energetisch verwertbarer Bestandteile aus zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen

Prognoseberechnung für Rückbaupotenzial

$$ru = \left(\frac{M_{ru} \cdot f_w \cdot f_v}{M} \right) \cdot 100$$

$$rc_{sd} = \left(\frac{M_{rc} \cdot f_w \cdot f_v \cdot MLP}{M} \right) \cdot 100$$

$$d_{ccr_{sd}} = \left(\frac{M_{dccr} \cdot f_w \cdot f_v}{M} \right) \cdot 100$$

Das **Loop-Potenzial (LP)** erweitert dieses Konzept, indem es auch Materialien einbezieht, die nicht in geschlossenen, sondern in offenen Kreisläufen verbleiben – etwa durch Downcycling oder energetische Verwertung. Es liefert ein realistischeres Bild der tatsächlichen Rückführbarkeit von Baustoffen, weil es neben hochwertigem Recycling auch minderwertige stoffliche Nutzungen oder Verluste durch Verbrennung einbezieht. Auch das LP kann theoretisch maximal 200 % betragen – je 100 % für den Pre-Use- und den Post-Use-Anteil (Rosen, 2021).

Zur Berechnung dieser Potenziale fließen verschiedene Parameter ein. Für die Pre-Use-Bewertung wird der Anteil an rezyklierten und nachwachsenden Rohstoffen innerhalb der Konstruktion herangezogen. Ziel ist es, den Einsatz nicht erneuerbarer Primärrohstoffe zu minimieren. Für die Post-Use-Bewertung werden auf Grundlage einer Massenermittlung jene Wertstoffe bestimmt, die beim Rückbau eines Gebäudes anfallen. Diese werden dann je nach Rückbauaufwand und Verwertungsweg unterschiedlichen Szenarien zugeordnet und so etwa Wiederverwendung, hochwertiges Recycling, Downcycling oder energetische Nutzung (Rosen, 2021).

Gesamtformel:

$$\mathrm{LP} = \mathrm{LP}_{\text{pre-use}} + \mathrm{LP}_{\text{post-use}}$$

Pre Use Komponenten:

$$\mathrm{LP}_{\text{pre-use}} = \mathrm{CLP}_{\text{pre-use}} + DC$$

$\mathrm{CLP}_{\text{pre-use}}$: Wiederverwendung, Recycling, nachwachsende Rohstoffe vor Nutzung

DC: Anteil downgecycelter Materialien vor Nutzung

Post Use Komponenten:

$$\mathrm{LP}_{\text{post-use}} = \mathrm{CLP}_{\text{post-use}} + dc + enr$$

$\mathrm{CLP}_{\text{post-use}}$: Wiederverwendung, hochwertiges Recycling, zertifizierte nachwachsende Rohstoffe

dc: Downgecycelte Materialien nach Rückbau

enr: Energetisch verwertete Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen

Zerlegung der Downcycling Komponente

$$\mathrm{LP}_{\text{post-use}} = \mathrm{CLP}_{\text{post-use}} + dc + enr$$

$\mathrm{CLP}_{\text{post-use}}$: Wiederverwendung, hochwertiges Recycling, zertifizierte nachwachsende Rohstoffe

dc: Downgecycelte Materialien nach Rückbau

enr: Energetisch verwertete Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen

Prognoseberechnung für Rückbaupotenzial

$$dc_{sd} = \left(\frac{M_{dc} \cdot f_w \cdot f_v}{M} \right) \cdot 100$$

Im Urban Mining Index (UMI) ist die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ein zentraler Faktor für die Bewertung der Rückführbarkeit von Baustoffen. Sie wird durch zwei wesentliche Parameter beschrieben: den Parameter Wert (fv) und den Faktor Arbeit (fw). Gemeinsam bestimmen sie die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Material nach seiner Nutzung in ein hochwertiges End-of-Life-Szenario, wie Wiederverwendung oder hochwertiges Recycling, überführt wird (Rosen, 2021).

Der Parameter Wert (fv) spiegelt den ökonomischen Anreiz zur Rückgewinnung eines Stoffes wider. Grundlage ist der aktuelle Verwertungserlös oder die Entsorgungskosten in Euro pro Tonne, wie sie zwischen Rückbauunternehmen und Entsorgern vereinbart werden. Materialien, die einen positiven Marktwert haben, wie etwa

Kupfer oder sauberer mineralischer Bauschutt, gelten als besonders werthaltig. Entsprechend steigt ihr Wertfaktor auf bis zu 1,3. Umgekehrt sinkt der Wertfaktor auf bis zu 0,6, wenn es sich um kostenintensive oder schwer verwertbare Materialien handelt, beispielsweise stark verschmutzter Bauschutt, Verbundstoffe oder thermisch zu verwertende Kunststoffe. Die Bewertung erfolgt über eine siebenstufige Skala, die von „äußerst negativ" bis „äußerst positiv" reicht. So wird für jedes Material ein realistischer ökonomischer Rückbauanreiz ermittelt. Ein Wertfaktor von 1,0 bildet die neutrale Ausgangsbasis für Materialien mit null oder leicht positivem Marktwert – diese gelten als vollständig rückführbar ohne Zusatzkosten (Rosen, 2021).

Preis (€/t)	Bewertung	Faktor f_v
880 €/t	äußerst positiv	1,3
420 €/t	sehr hoch positiv	1,2
150 €/t	hoch positiv	1,1
0 €/t	leicht positiv	1,0
–23 €/t	leicht negativ	0,9
–54 €/t	hoch negativ	0,8
–146 €/t	äußerst negativ	0,6

Tab. 5: Definition Faktor fv im Urban Mining Index

Ergänzt wird dieser ökonomische Aspekt durch den Faktor Arbeit (fw). Dieser beschreibt den Aufwand für Rückbau und Demontage, gemessen in physikalischer Arbeit (z. B. benötigte Arbeitszeit oder Energieeinsatz). Basierend auf wissenschaftlichen Rückbauanalysen sowie Interviews mit Abbruchunternehmen wird der Arbeitsaufwand in fünf Kategorien eingestuft: von „sehr gering" bis „sehr hoch". Die Einordnung erfolgt material- und bauteilspezifisch und so ist beispielsweise der Rückbau von Dämmstoffen oder Verklebungen aufwendiger als der von standardisierten Elementen (Rosen, 2021).

Zusammen bilden fv und fw ein Bewertungsinstrument zur Prognose der Rückführungswahrscheinlichkeit. Das

Arbeit [MJ/m²]	Bewertung	Faktor (f_w)
≤ 1. Quintil	sehr gering	1,0
≤ 2. Quintil	gering	0,9
≤ 3. Quintil	mittel	0,8
≤ 4. Quintil	hoch	0,7
> 4. Quintil	sehr hoch	0,6

Tab. 6: Definition Faktor fw im Urban Mining Index

Produkt dieser beiden Faktoren darf maximal 1,0 betragen, um sicherzustellen, dass rechnerisch nicht mehr als 100 % eines Materials zurückgewonnen werden können. Je höher der Wert eines Materials und je geringer der Aufwand für den Rückbau, desto größer ist seine Bedeutung für das Kreislaufpotenzial eines Bauwerks.

Ein grundlegender Unterschied zwischen dem Urban Mining Index (UMI) und der Concular-Berechnung besteht darin, dass der UMI bisher ausschließlich für Neubauten konzipiert wurde und bislang nicht digital integriert ist. Stattdessen basiert er auf einer Excel-basierten Bewertungsmatrix, in die die Zirkularitätsanalyse eines Gebäudes manuell eingepflegt wird. Diese statische Methodik steht im Kontrast zur digitalen Datenstruktur von Concular, macht den UMI jedoch nicht weniger interessant.

Ein Blick in den UMI zeigt, dass der Hauptschwerpunkt in der inhaltlichen Interpretation der Rückbau- und Materialpotenziale liegt. Anders als bei Concular, wo der Fokus stark auf der Trennbarkeit, Demontierbarkeit, Rezyklierbarkeit und Wiederverwendbarkeit einzelner Bauteile liegt, richtet sich der Blick des UMI stärker auf das Materialverhalten in Bezug auf den Lebenszyklus. Hierbei unterscheidet er systematisch nachwachsende Rohstoffe, Downcycling-Fraktionen und stofflich recycelbare Materialien, die entweder direkt im Kreislauf bleiben oder diesen perspektivisch verlassen, so etwa aufgrund quali-

tativer Verluste beim Recycling (Rosen, 2021).

Bemerkenswert ist zudem, dass der UMI diese Betrachtung nicht nur für den Pre-Use-Zustand (also die Herkunft und Qualität der eingesetzten Materialien), sondern auch für den Post-Use-Fall anwendet. Dabei geht es nicht nur darum, wie theoretisch ein Bauteil demontiert oder getrennt werden kann, sondern vielmehr um eine konkrete Aussage zum tatsächlichen Materialoutput nach dem Rückbau. Das heißt: Es wird aufgezeigt, ob Materialien wiederverwendet, stofflich oder energetisch verwertet werden können und ob diese Prozesse qualitativ hochwertig, downgecycelt oder fossil erfolgen. Der UMI analysiert also explizit, was mit den Materialmassen tatsächlich passiert, während Concular eher beschreibt, wie ein Rückbau technisch umsetzbar wäre (Rosen, 2021).

Genau darin liegt die zentrale Abgrenzung: Während Concular nachvollziehbare Informationen zur Demontagefähigkeit, Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit auf Bauteilebene liefert, bleibt dabei offen, wie das Material im Kreislauf konkret weitergenutzt wird (Notion Site Concular, 2025). Der UMI hingegen macht die stofflichen Konsequenzen des Rückbaus sichtbar und stellt dar, ob Materialien zirkulär im gleichen oder einem minderwertigen Kontext genutzt werden oder gar energetisch verschwinden. Wie groß ist der Arbeitsaufwand und der Wert des Materials. Diese Bilanzierungstiefe ist eine besondere Stärke des UMI, auch wenn die methodische Darstellung etwa in Balkendiagrammen deutlich anders erfolgt als bei Conculars eher prozessualer Auswertung. Die Faktoren Wert und Arbeit basieren auf wissenschaftlichen, empirischen Ergebnissen und lassen sich aus einem tatsächlichen Rückbauprozess ableiten. Diese Eigenschaft fehlt bei Concular, da rein die Demontageart oder die Trennbarkeit, nicht direkt den Aufwand beschreibt. Das wird unteranderem von Concular auch schon festgestellt und eine Ankündigung zur Implementierung in der Zukunft wird formuliert (Notion Site Concular, 2025).

Beide Systeme arbeiten jedoch mit vergleichbaren Grundprinzipien: Sie unterscheiden in einen Pre-Use-Fall,

in dem Materialien nach Wiederverwendung, Recycling oder Primärrohstoffklassifikation eingeordnet werden, sowie einen Post-Use-Fall, in dem die Rückführungspotenziale bewertet werden. Bei Concular fließt hier etwa ein, wie leicht ein Bauteil demontiert oder getrennt werden kann. Beim UMI hingegen wird zusätzlich der Faktor Arbeit (f_w) berücksichtigt, der den tatsächlichen Aufwand für den selektiven Rückbau beschreibt. Beim UMI ergibt sich daraus eine bilanzierbare Rückbauwahrscheinlichkeit, während Concular diese Bewertung eher qualitativ und komponentenbasiert aufbaut.

Insgesamt lässt sich festhalten: Concular bietet eine anwendungsorientierte, bauteilbasierte Einschätzung der Rückbaufähigkeit, der UMI dagegen liefert eine systematische Stoffstrombilanzierung mit besonderem Fokus auf Kreislaufverbleib und Wertverlust. Beide Ansätze ergänzen sich inhaltlich und ermöglichen eine fundierte, gesamtheitliche Bewertung zirkulären Bauens.

2.4 Einflussgrößen der Kreislauffähigkeit

Wie gerade schon bei den Bewertungstools gesehen, hängt die Kreislauffähigkeit von bestimmten Faktoren ab. Um einen tiefergehenden Einblick zu diesen „Hebeln“ zu erhalten werden im Folgenden verschiedene untersucht und beleuchtet. Es findet auch eine Recherche zu Ausblicken statt.

2.4.1 Trennbarkeit für zukünftige Demontage: Lösbare Verbindungen

Ein zentrales Kriterium für die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden und Bauteilen ist die Lösbarkeit von Konstruktionen. Denn nur wenn Bauteile rückgebaut und ihre Materialien sortenrein getrennt werden können, ist ein hochwertiges Recycling oder die Wiederverwendung überhaupt möglich. Im Sinne einer kreislauffähigen Bauweise rückt daher die Auswahl geeigneter Verbindungsarten zu-

nehmend in den Fokus der Planung und Ausführung. Um Materialien am Ende ihrer Nutzungsdauer sortenrein zurückbauen und verwerten zu können, reicht es nicht aus, nachhaltige Baustoffe auszuwählen – auch ihre Verbindungstechniken müssen konsequent unter dem Aspekt der Trennbarkeit geplant werden. Nur so kann eine schadlose Wiederverwertung gelingen und das Prinzip des zirkulären Bauens ganzheitlich umgesetzt werden (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Verbindungen sind kein rein technisches Detail, sondern ein strategisches Entwurfsinstrument. Ihre Qualität und Konstruktionslogik entscheiden wesentlich darüber, ob Materialien als Wertstoffe im Kreislauf gehalten werden können oder als nicht trennbarer Verbund zu Abfall werden. Deshalb ist es wichtig, bereits in frühen Planungsphasen ein Verständnis dafür zu entwickeln, welche Fügetechniken in welchen Bauteilebenen vom Dach bis zur Gründung sinnvoll einsetzbar sind. In diesem Kontext soll ein Überblick über bestehende und innovative, lösbare Verbindungsmöglichkeiten helfen, zu erkennen, welche Lösungen sich praktisch bewährt haben und wie sich diese in Entwurfsszenarien gezielt optimieren lassen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Neben klassisch geregelten Fügeverfahren nach DIN-Normen wie Verschrauben, Klemmen oder Einpressen rücken zunehmend alternative Systeme in den Vordergrund, insbesondere solche, die rückstandslos lösbar, werkzeugfrei oder wiederverwendbar sind. Besonders relevant wird dies in Verbindung mit digitalen Bewertungssystemen wie Concular, das in Kombination mit BIM-Modellen und digitalen Materialpässen die Art und Qualität der Verbindungen systematisch erfasst und auswertet. Bei Concular spielt dabei der Begriff der Demontage eine zentrale Rolle: Die Plattform bewertet Verbindungen nicht allein auf Basis ihrer technischen Struktur, sondern auch hinsichtlich ihrer Demontagefähigkeit – also der Möglichkeit, Bauteile zerstörungsfrei und effizient aus bestehenden Konstruktionen zu entnehmen. Dafür werden unterschiedliche Kategorien von Fügemöglichkeiten verwendet, die dabei helfen sollen, die demontierbaren Verbindungen zu klassifizieren und nach-

vollziehbar zu machen. Diese Einordnung dient nicht nur der technischen Bewertung, sondern ermöglicht auch eine transparente Kommunikation im Planungsprozess und eine strategische Auswahl zirkulärer Lösungen (Notion Site Concular, 2025).

Auch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) und der Urban Mining Index (UMI)berücksichtigen diese Fügetechniken systematisch in ihren Bewertungsverfahren. Die Kenntnis über die Qualität und Lösbarkeit der Verbindung ist bei allen Methoden entscheidend, um Materialien möglichst lange im Kreislauf zu halten und ein echtes Urban Mining zu ermöglichen, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert.

Trotz dieser zunehmenden Aufmerksamkeit ist die Lösbarkeit von Konstruktionen nach wie vor nicht vollständig standardisiert oder technisch eindeutig zu bewerten. Forschungsinstitute wie der Lehrstuhl für Baukonstruktion und Entwurf Materialkunde der Bergischen Universität Wuppertal oder das ILEK der Universität Stuttgart arbeiten daher an Methoden, die Lösbarkeit nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch bewertbar machen. So wird etwa der Arbeitsaufwand zur sortenreinen Trennung mit dem „Faktor Arbeit“ auf einer fünfstufigen Skala von „sehr geringer“ bis „sehr hoher Aufwand“ bewertet. Das ILEK entwickelte darüber hinaus ein System zur Erfassung der Schäden beim Rückbau, um zu beurteilen, ob eine Verbindung ohne Zerstörung lösbar ist. Bewertet wird dies ebenfalls skaliert, unter anderem mithilfe der sogenannten Fügematrix, die in sogenannten „Recyclinggraden“ erfasst, wie gut sich einzelne Konstruktionen demontieren und rückführen lassen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden exemplarisch Verbindungen vorgestellt, die dem Recycling Atlas (Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource) entnommen sind. Diese bilden bewährte und theoretisch fundierte Strategien rückbaugerechter Konstruktionen ab. Auch wenn sich daraus keine exakten quantitativen Aussagen über den tatsächlichen Aufwand der Demontage oder Rückgewinnung ableiten lassen, bieten diese Beispiele eine solide Grundlage

für die konzeptionelle Weiterbearbeitung. Die dargestellten Verbindungstechniken dienen somit nicht nur als Anregung, sondern auch als theoretisch anwendbare Referenzen für die Entwicklung eigener Entwurfsansätze im Sinne der Kreislauffähigkeit (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021). Die Quellen werden immer am Ende des Absatzes notiert.

Gründung

Bei bestehenden Gebäuden ist eine nachträgliche Dämmung unter der Bodenplatte in der Regel nicht mehr umsetzbar. Daher konzentrieren sich kreislaufgerechte Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeschutzes auf die Innendämmung von erdberührten Bauteilen, insbesondere den Kellerwänden.

Eine nachhaltige Alternative zur konventionellen, verklebten Perimeterdämmung bietet der Einsatz von Recycling-Schaumglasschotter in Gewebesäcken. Diese Konstruktion verzichtet auf Klebstoffe, ist vollständig rückbaubar und ermöglicht eine sortenreine Wiederverwertung der



Abb. 7:
Gründung mit
Schaumglasschotter

Materialien. Die Gewebesäcke dienen als Montagehilfe, in die der Schaumglasschotter schichtweise eingefüllt wird. Die Konstruktion ist druckstabil, diffusionsoffen, resistent gegen Schädlinge und kann witterungsunabhängig eingebaut werden. Auch bei zeitweiser Durchfeuchtung, etwa durch Starkregen, bleibt die Dämmwirkung erhalten. Eine Dränage unterhalb der Dämmung schützt zusätzlich vor aufstauendem Wasser. Bei Hanglagen können zwei Lagen hintereinander verlegt werden, um dem Wasserdruck standzuhalten (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Ergänzend zur Dämmung ist auch eine nachhaltige Kellerabdichtung von Bedeutung. Statt verklebter Bitumendickbeschichtungen kann ein mehrlagiges, lose verlegtes Abdichtungssystem aus PE-HD-Kunststoffen eingesetzt werden. Es ist rückbaubar, geprüft dicht und dampfdiffusionsoffen. Die Abdichtungsbahn wird verschweißt, durch ein Vlies geschützt und mit einer Hinterlüftungsbahn ergänzt, die Feuchtigkeit aus dem Bauteil nach außen transportiert. Diese Lösung eignet sich besonders für Bestandsgebäude, da sie auf vorhandene Wandmaterialien aufgebracht werden kann, ohne diese zu beeinträchtigen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Alternativ lässt sich bei Betonbauten eine Weiße Wanne aus WU-Beton nutzen. Wird sie mit einem Fugenblech aus verzinktem Stahl (statt Injektionsschläuchen) ergänzt, bleibt die Konstruktion vollständig mineralisch und ermöglicht ein sortenreines Betonrecycling beim späteren Rückbau (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Außenbekleidung (Wand und Dach)

Moderne Außenbekleidungen lassen sich heute zunehmend mit lösbaren Verbindungssystemen planen und umsetzen, was insbesondere bei hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen zu finden ist. Solche Systeme bestehen aus voneinander getrennten Funktionsschichten (Bekleidung, Unterkonstruktion, Winddichtung, Dämmung), die beim Rückbau separat entfernt und sortenrein recycelt oder wiederverwendet werden können.



Abb. 8: Winddichtung mit der Verbindungsart „tackern“

Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) bieten vielfältige Möglichkeiten: Bekleidungen aus Platten, Schindeln, Blechen oder Textilien lassen sich sichtbar oder verdeckt verschrauben, stecken, einklemmen oder einhängen. Auch für Steildächer gibt es lösbare Schichten, wie zum Beispiel verschraubte Deckungen auf Trapezblechen oder Lattungen. Bei VHF-Systemen mit Naturstein wurden neue mechanische Befestigungen entwickelt, bei denen die Platten ohne Klebstoffe in Alu-Profile eingehängt werden – sie sind einzeln austauschbar und rückbaufähig.

Auch bei Vormauerschalen aus Backstein gibt es inzwischen mörtelfreie Trockenstapelsysteme mit Edelstahlclips und Dübelankern, die die Steine ohne Verklebung sicher fixieren und wieder demontierbar machen. Einzige Ausnahmen sind hier Sockel- und Abschlussbereiche mit Mörtel.

Winddichtungen können z. B. als geschraubte Platten oder getackerte Bahnen ausgeführt werden, die zwar oft nicht zerstörungsfrei entfernbar sind, aber in der Praxis gut trennbar. Auch Dämmungen in Platten- oder Mattenform lassen

sich klemmen oder mit Schrauben befestigen, was ihre Rückbaubarkeit erleichtert.

Nicht hinterlüftete Fassaden sind dagegen meist schwer lösbar. Ein innovativer Ansatz ist ein neues WDVS-Klettsystem, bei dem Putzträgerplatten aus Recycling-Schaumglas per Klett mit dem Untergrund verbunden sind. Das Dämmmaterial lässt sich dadurch sortenrein rückbauen, allerdings sind Putz, Trägerplatte und Vlieskaschierung weiterhin fest miteinander verbunden, was den vollständigen Rückbau erschwert. Das System befindet sich noch in der Erprobung (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Dachabdichtungen

Im Bereich von Flachdächern und Dachterrassen sind bislang häufig geklebte Verbundkonstruktionen üblich. Diese erschweren den Rückbau und behindern sortenreines Recycling. Heute stehen jedoch zahlreiche mechanische und reversible Verbindungslösungen zur Verfügung, die sowohl bei der Ausführung als auch beim späteren Rückbau Vorteile bieten.

Statt fest verklebter Dachschichten (Dampfsperre, Dämmung, Abdichtung) empfiehlt sich der Einsatz mechanisch gesicherter Abdichtungen, z. B. durch Auflast mit Kies, Plattenbelägen oder Begrünung. Auch die Kombination aus lose verlegter Abdichtung und punktueller Verankerung mit Schrauben, Profilen oder Dübeln ist möglich. Diese Techniken erlauben Rückbaubarkeit und Trennung der Bauteilschichten.

Ein Klettsystem für Dachabdichtungen stellt eine neue Entwicklung dar: Dabei werden Hakenbänder mit der Tragkonstruktion verschraubt, die Abdichtungsbahn mit aufkaschiertem Flauschvlies wird lediglich aufgedrückt und hält kraftschlüssig, womit eine thermische Verschweißung nur an den Rändern nötig ist.

Innenwandbekleidungen

Im Innenausbau bieten zahlreiche moderne Systeme heute die Möglichkeit, Konstruktionen lösbar, sortenrein trennbar und wiederverwendbar zu gestalten.

Ständerwände aus Holz oder Metallprofilen ermöglichen eine einfache Demontage und Anpassung, z. B. bei Nutzungsänderungen. Beplankt mit verschraubten Gipskarton-, Lehmbau- oder Holzwerkstoffplatten und gedämmt mit eingelegten Matten, lassen sich diese Trockenbauwände flexibel auf- und abbauen. Für Büroanwendungen gibt es vollständig versetzbare Trennwandsysteme, z. B. aus Glas und Metall, die nach C2C-Kriterien zertifiziert sind.

Im Gegensatz dazu stellen massive, verputzte Innenwände ein Problem für das Recycling dar, da Gipsputz mit dem Mauerwerk einen kaum trennbaren Verbund eingeht. Deshalb werden im Skelettbau bevorzugt lösbare Innenverkleidungen eingesetzt, etwa Rasterdecken mit Aluminium-Unterkonstruktion oder verschraubte Lehmbauplatten.

Ein Beispiel für besonders hochwertige, wieder lösbare Befestigungssysteme sind Metallklettbänder, die aus fein gestanzten Edelstahlbändern bestehen. Sie funktionieren ähnlich wie herkömmliche Klettverschlüsse, bieten jedoch

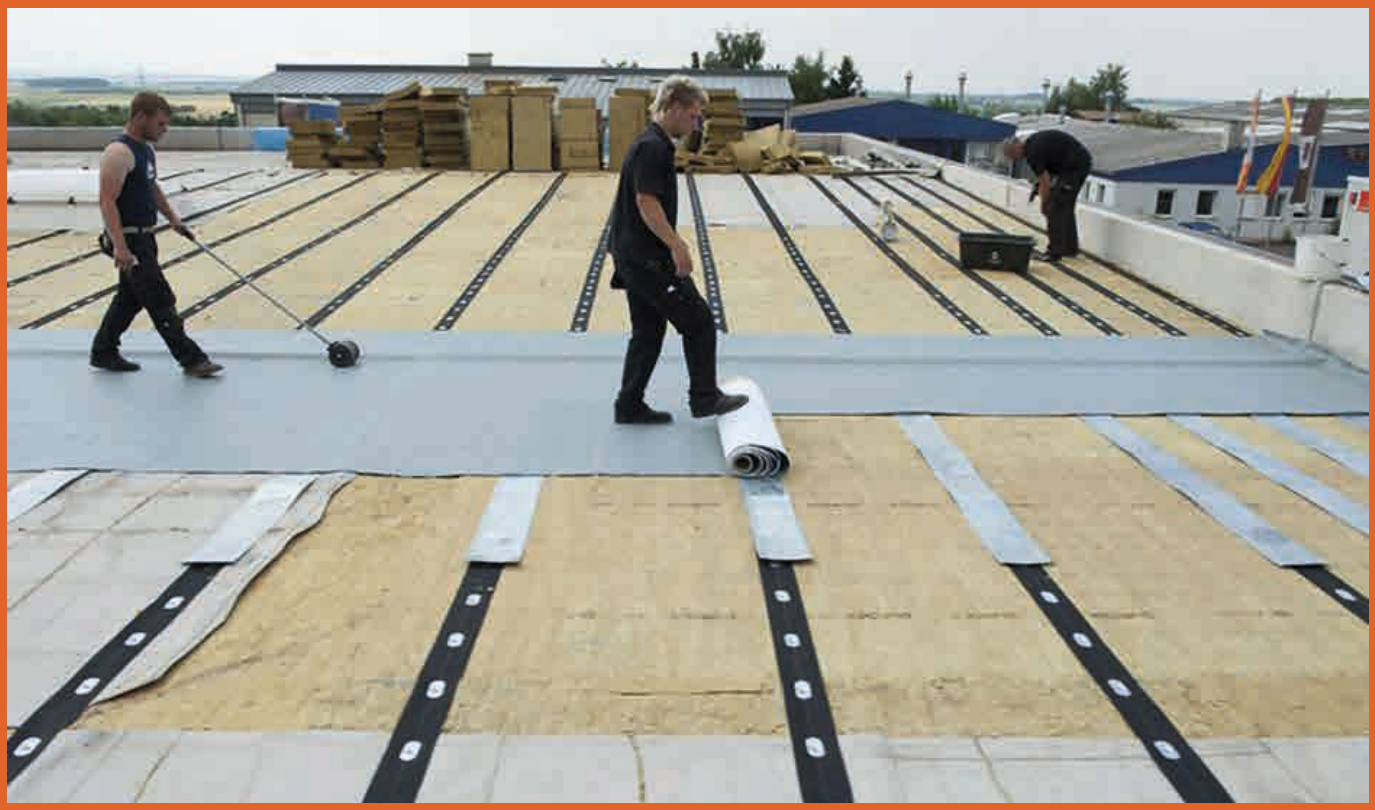


Abb. 9:
Klettverbindung
bei
Dachabdichtungs-
Bahnen

deutlich höhere Haltekräfte (bis zu 7 t/m²), chemische und thermische Beständigkeit sowie eine fast unbegrenzte Wiederverwendbarkeit – werkzeuglos und reversibel.

Für Wandbekleidungen im Nassbereich gibt es inzwischen Systeme aus lösbar befestigten Glasplatten, die entweder mit Magnetbefestigungen oder über mechanische Schienensysteme fixiert werden. Dabei werden Glaselemente eingehängt oder magnetisch gehalten und können bei Bedarf zerstörungsfrei demontiert werden – etwa mit Saughebern. Auch für Akustikverkleidungen finden solche Magnetsysteme zunehmend Anwendung (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Fußbodenkonstruktionen

Konventionelle Fußbodenaufbauten sind häufig als schwer trennbare Verbundkonstruktionen ausgeführt, insbesondere bei Fußbodenheizungen mit verklebtem Belag und eingebetteten Rohrsystemen. Im Sinne zirkulären Bauens bieten heute jedoch zahlreiche Alternativen die Möglichkeit, Materialien lösbar miteinander zu verbinden und so eine sortenreine Trennung beim Rückbau zu ermöglichen.

Im Bereich der Fußbodenbeläge sind schwimmend verlegte Systeme besonders vorteilhaft. Linoleum-Paneele mit Klickverbindung etwa bestehen aus einer Holzfaserträgerplatte mit werkseitig aufgebrachtem Belag und einer Kork-Gegenschicht. Diese Systeme lassen sich ohne Klebstoff verlegen, sind auf unebenen Untergründen einsetzbar und ermöglichen eine einfache Demontage. Ähnlich funktioniert ein trocken verlegbares System für keramische Fliesen, bei dem die Fliesen durch ihr Eigengewicht und eine umlaufende Korkschicht in Position gehalten werden. Die Fugen werden mit einer lösbaren Masse geschlossen, sodass einzelne Elemente problemlos ersetzt werden können.

Auch textile Bodenbeläge lassen sich reversibel gestalten: Selbstliegende Teppichfliesen mit Schwerbeschichtung benötigen keine Verklebung, sondern werden lediglich punktuell fixiert. Spannteppiche wiederum werden an den Rändern durch Nagelleisten oder Klettstreifen gehalten. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, das sich positiv auf

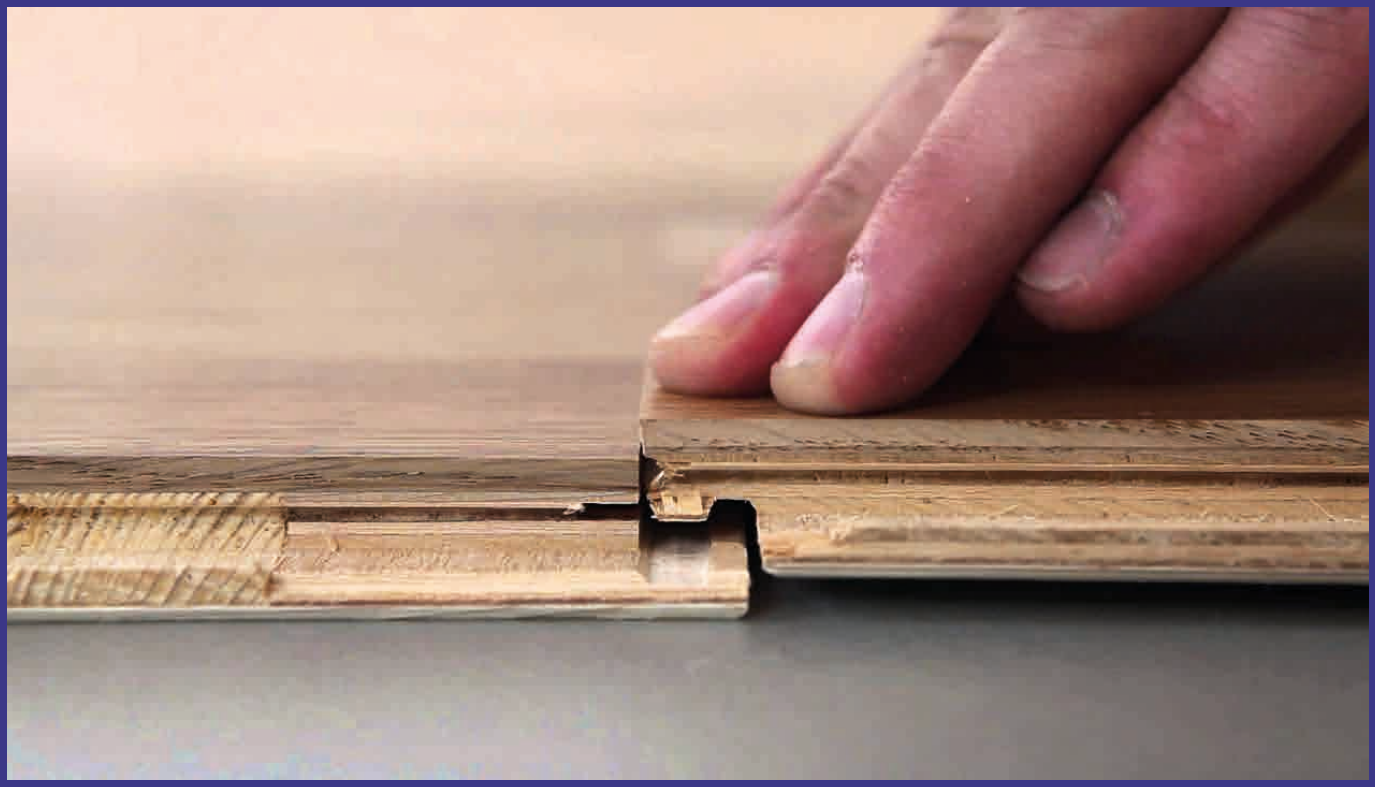


Abb. 10: Klickverbindung Fußbodenbelag

Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit auswirkt. Beide Methoden ermöglichen eine Rückbaubarkeit ohne Materialverlust.

Ein weiterer Ansatz für lösbare Bodensysteme sind Konstruktionen mit Pappwabenplatten, die mit Schüttmaterial wie Sand oder Granulat gefüllt werden. Diese Systeme dienen nicht nur der Schalldämmung, sondern ermöglichen im Rückbau die sortenreine Trennung von Pappe und Schüttung. Der Vorteil liegt in der einfachen Handhabung sowie der Möglichkeit, das Schüttgut abzusaugen und wiederzuverwenden.

Trockenestriche, so zumeist schwimmend oder verschraubt verlegte Holzwerkstoff- oder Gipsfaserplatten, bieten eine alternative Lösung zum klassischen Nassestrich. Sie benötigen keine Trocknungszeit, sind in der Aufbauhöhe flexibel und lassen sich bei Umbauten schnell demontieren. Auch Tonziegel in Estrichform können als wasserfeste, aber rückbaubare Lösung eingesetzt werden, vor allem, wenn sie mit Nut-und-Feder-Systemen kombiniert und ohne dauerhafte

Verklebung verlegt sind (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Fensterkonstruktionen

Fenster und Außentüren werden traditionell häufig mit Bauschaum fixiert und gleichzeitig abgedichtet, was ihre spätere Demontage und das sortenreine Recycling erschwert. Durch eine funktionale Trennung von Befestigung und Abdichtung sowie eine durchdachte Baukonstruktion lassen sich heute jedoch gut lösbare Anschlüsse realisieren.

Zur Befestigung von Fenstern und Außentüren am Bauwerk eignen sich geschraubte Metallwinkel oder Fensterkrallen, ebenso wie Verklotzungen mit Holzkeilen. Bei Pfosten-Riegel-Fassaden erfolgt die Befestigung meist über mehrteilige Metallwinkelkonstruktionen, während bei Holztragwerken gelegentlich konische Holzkeile zum Einsatz kommen. Diese Methoden ermöglichen eine einfache, zerstörungsfreie Demontage.

Die Abdichtung zwischen Rahmen und Wand lässt sich ebenfalls lösbar gestalten. Anstelle von Bauschaum können Materialien wie Stopfwolle, Kalfaterbänder (z. B. aus Hanf) oder EPDM-Folien verwendet werden. Letztere sind zwar oft verklebt, können jedoch durch ihre linienförmige Anwendung problemlos entfernt werden. Besonders nachhaltig sind Abdichtungsfolien, die mit Klemmleisten befestigt sind, denn sie sind vollständig rückbaubar und recyclingfreundlich.

Bei der Konstruktion der Fenster- und Türelemente selbst haben sich zerlegbare Systeme etabliert, etwa aus Holz-Aluminium oder reinen Metallprofilen. Dank Schraub- und Steckverbindungen lassen sich einzelne Komponenten wie Glas, Dichtungen und Rahmenmaterialien trennen, was Recyclingquoten von über 90 % ermöglicht. Einige Stahlfenster bestehen sogar vollständig aus recycelbarem Stahl, ganz ohne verklebte Kunststoffanteile. Pfosten-Riegel-Konstruktionen sowie moderne Structural-Glazing-Systeme mit Holzkonstruktionen bieten nicht nur gute Rückbaubarkeit, sondern auch eine bessere CO_2-Bilanz gegenüber Aluminiumvarianten. Auch bei diesen Systemen sorgen lösbare

Verbindungen für den einfachen Austausch einzelner Elemente.

Im Bereich des Sonnen- und Einbruchschutzes setzen sich zunehmend mechanisch befestigte Alternativen durch. Während herkömmliche Rollläden häufig aus schwer trennbaren Materialverbünden bestehen, lassen sich Schiebe-, Klapp- und Faltläden aus Holz oder Metall, die mit Schraub- oder Stecksystemen montiert sind, einfach demontieren und sortenrein recyceln. Diese Entwicklungen zeigen, dass auch bei Fenstern, Türen und deren Zubehör eine kreislauffähige Bauweise heute technisch möglich und zunehmend verbreitet ist (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Insgesamt zeigt sich: Die Lösbarkeit von Verbindungen ist ein wesentliches Instrument der Kreislauffähigkeit, das bereits in der Entwurfsphase mitgedacht werden muss. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an erprobten sowie neu entwickelten Lösungen, doch ihr Potential wird in der Praxis noch längst nicht ausgeschöpft. Die systematische Bewertung, Digitalisierung und planerische Integration von Fügestrategien stellt daher eine zentrale Aufgabe dar, um zirkuläres Bauen nicht nur möglich, sondern praktikabel und wirtschaftlich attraktiv zu machen. Concular bietet in diesem Zusammenhang ein wertvolles Instrumentarium, um die Demontagefähigkeit gezielt erfassbar zu machen, unterschiedliche Verbindungstypen vergleichbar zu kategorisieren und konkrete Handlungsansätze für kreislauffähige Planungsprozesse zu schaffen.

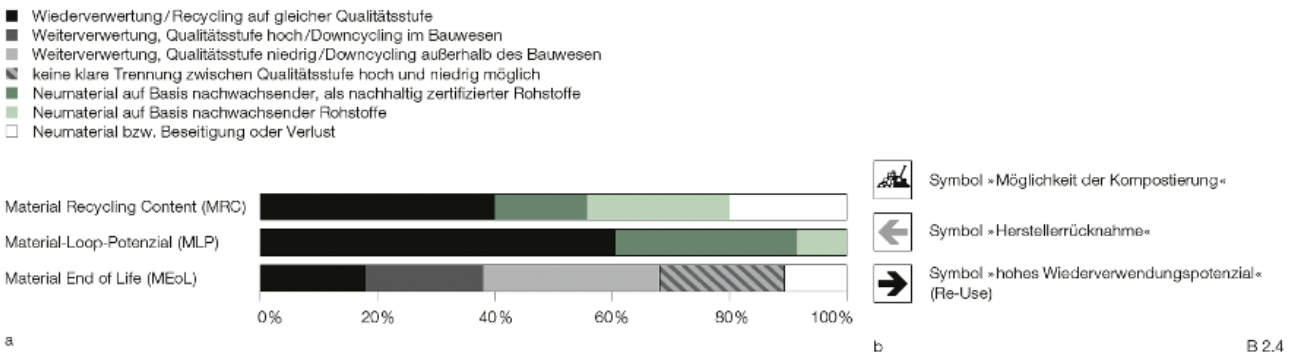
2.4.2 Recyclingpotenzial der Baustoffe

Neben der Lösbarkeit von Konstruktionen ist das Recyclingpotenzial ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Bauprodukten. Es beschreibt die Fähigkeit eines Materials, nach seiner Nutzung stofflich verwertet und in den Kreislauf zurückgeführt zu werden, was idealerweise sortenrein, schadstofffrei und ohne Qualitätsverlust ist. Damit wird das Recyclingpotenzial zu

Neben der Lösbarkeit von Konstruktionen ist das Recyclingpotenzial ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Bauprodukten. Es beschreibt die Fähigkeit eines Materials, nach seiner Nutzung stofflich verwertet und in den Kreislauf zurückgeführt zu werden, was idealerweise sortenrein, schadstofffrei und ohne Qualitätsverlust ist. Damit wird das Recyclingpotenzial zu einer zentralen Kenngröße für die nachhaltige Planung und Materialwahl im zirkulären Bauen.

Um das Recyclingpotenzial systematisch greifbar zu machen, wurden an der Bergischen Universität Wuppertal im Rahmen des Recycling Atlas verschiedene Bewertungsansätze entwickelt, die über bloße Materialklassifikationen hinausgehen. Eine wichtige Bewertungsgröße ist dabei der sogenannte Material Recycling Content (MRC). Dieser Balkenwert zeigt an, wie hoch der tatsächliche Anteil an Recyclingmaterialien in einem Bauprodukt derzeit ist. Die Angaben beruhen auf produktspezifischen Informationen, so vor allem aus Umweltproduktdeklarationen (EPDs), Herstellerdaten oder öffentlich zu-

Abb. 11:
Einstufung des Recycling-Potenzials nach dem Recycling-Atlas



gänglichen Quellen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Ergänzt wird diese Bewertung durch das Material-Loop-Potenzial (MLP), das theoretisch angibt, welcher Recyclinganteil unter idealen Bedingungen unteranderem bei optimaler Trennung, Rückführung und Aufbereitung erreichbar wäre. Diese Werte basieren auf wissenschaftlichen Untersuchungen, Testreihen sowie Erfahrungen aus Industrie und Praxis. Dabei wird deutlich: Das Potenzial zur Kreislaufführung ist häufig deutlich größer als die aktuelle Umsetzung, weil zu wenige geeignete Sekundärrohstoffe verfügbar sind oder weil Verwertungsstrukturen fehlen. Besonders hervorzuheben ist, dass MRC und MLP sich ausschließlich auf tatsächlich gebrauchte (Post-Use-) Materialien beziehen. Rückläufe aus der eigenen Produktion (Pre-Consumer-Materialien) oder industrielle Nebenprodukte fließen nicht in diese Bewertung ein, da sie nicht aus dem Recycling gebrauchter Produkte stammen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Ein weiterer Maßstab in diesem Bewertungssystem ist der sogenannte End-of-Life-Balken (MEoL). Er zeigt, was tatsächlich mit einem Material nach dessen Nutzung geschieht. Die Einordnung reicht von dunklen Balkenanteilen für hochwertige Recyclingoptionen über abgestufte Grautöne für Downcycling-Szenarien bis hin zu weißen Segmenten, die auf vollständigen Materialverlust hinweisen – etwa durch Verbrennung ohne Rückgewinnung oder Deponierung. Darüber hinaus werden auch zukünftige Potenziale berücksichtigt, etwa die Kompostierbarkeit biotischer Materialien oder die Wiederverwendung ganzer Bauteile. Diese Aspekte lassen sich jedoch nicht präzise quantifizieren und werden deshalb qualitativ bewertet. Materialien mit hoher Rückbaufähigkeit, Schadstofffreiheit oder bestehenden Hersteller-Rücknahmesystemen gelten hier als besonders zukunftsfähig (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Systematisch dokumentiert werden diese Bewertungen im Recycling Atlas – Gebäude als Materialressource, in

dem Baustoffe nach Materialarten (biotisch, fossil, mineralisch, metallisch) und Anwendungsbereichen geordnet sind. Für die Weiterbearbeitung dieser Arbeit bieten die dort abgebildeten MRC-, MLP- und MEoL-Werte eine fundierte Grundlage, die ähnlich wie Lambda-Werte bei der Wärmeschutzberechnung in die Variantenentwicklung der Konstruktion einfließen können. Auch wenn diese Werte keine absoluten Nachweise darstellen, lassen sie dennoch verlässliche Tendenzen erkennen und ermöglichen eine theoretisch fundierte Auseinandersetzung mit Materialentscheidungen im Entwurf (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Um die Bewertungslogik weiter zu fundieren, lässt sich diese Arbeit ergänzend um die Erkenntnisse der Normungsroadmap Circular Economy von DIN, DKE und VDI (2023) erweitern. Die Roadmap beschreibt die dringende Notwendigkeit neuer Standards, Datenmodelle und Begriffsdefinitionen, um Recyclingfähigkeit, Rückbaufreundlichkeit und Stoffkreisläufe im Bausektor systematisch zu fördern. Sie legt dabei zentrale Anforderungen an Materialklassifikationen, Schnittstellenlogiken und digitale Dokumentationsprozesse fest, die eine einheitliche Bewertung wie im Recycling Atlas überhaupt erst ermöglichen. Für diese Arbeit entsteht daraus eine Verbindung zweier sich ergänzender Perspektiven: Die quantifizierbaren Werte aus dem Recycling Atlas liefern messbare Inhalte, während die Roadmap den normativen Rahmen beschreibt, in dem sich diese Inhalte zukünftig strukturell verankern lassen (DIN, DKE, & VDI, 2025).

Im Folgenden werden die vier im Atlas definierten Materialkategorien – biotisch, fossil, mineralisch und metallisch – näher beleuchtet, um zu untersuchen, welches konkrete Recyclingpotenzial ihnen jeweils zugeschrieben werden kann. Ziel ist es, daraus Erkenntnisse für die Materialwahl in der planerischen Umsetzung zu gewinnen und gezielt kreislauffähige Alternativen in die weiteren Entwurfsüberlegungen einzubinden. Die Quellen werden immer am Ende des Absatzes notiert.

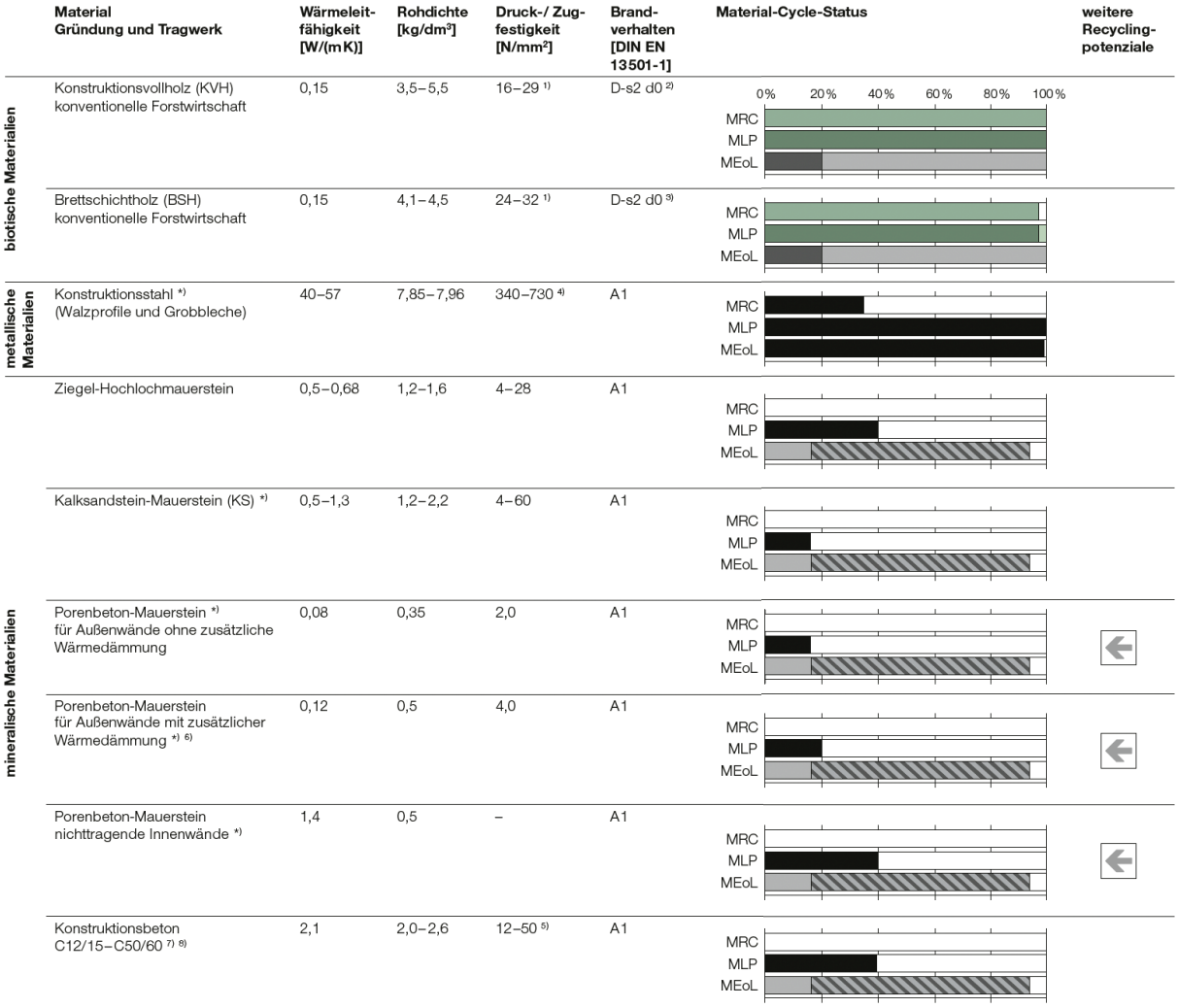
Biotische Materialien

Biotische Materialien entstehen aus pflanzlichem oder tierischem Wachstum und können nach ihrer Nutzung verrotten, wodurch sie dem natürlichen Nährstoffkreislauf wieder zugeführt werden. Da sie sich in relativ kurzer Zeit erneuern und oft in ähnlichen Zeiträumen wie Gebäude genutzt werden, gelten sie als nachhaltig. Materialien wie Holz sind daher im Bau grundsätzlich empfehlenswert, da sie theoretisch unbegrenzt verfügbar sind.

Biotische Baustoffe bieten grundsätzlich ein hohes Potenzial für eine ressourcenschonende und abfallarme Bauweise. Da sie aus pflanzlichem oder tierischem Ursprung stammen, lassen sich unbehandelte biotische Materialien theoretisch vollständig in den natürlichen Kreislauf zurückführen, sie werden dem Ökosystem lediglich für eine bestimmte Zeit entnommen und kehren am Ende ihrer Nutzung als Nährstoffe in den biologischen Kreislauf zurück. Dieses Idealbild eines geschlossenen Stoffkreislaufs trifft jedoch nur dann zu, wenn die eingesetzten Rohstoffe aus kontrollierter, nachhaltiger Bewirtschaftung stammen.

Wird etwa bei der Rohstoffgewinnung intensiv auf Monokulturen gesetzt, wie im Fall großflächiger Palmölplantagen auf gerodeten Regenwaldflächen, kann das zu gravierenden ökologischen Schäden führen. Die Folge ist nicht nur ein Verlust an Biodiversität, sondern auch die Störung der Nährstoffkreisläufe in globalen Ökosystemen. Daher muss sichergestellt sein, dass Pflanzen oder tierische Ausgangsstoffe in einem Maße „geerntet“ werden, das ihre Regeneration erlaubt. Dies gilt auch für biotische Nebenprodukte, die bei anderen Produktionsprozessen anfallen, wie unteranderem bei Schafschurwolle oder Seegras. Auch sie können nur dann als ökologisch verträgliche Baustoffe gelten, wenn der ursprüngliche Herstellungs- oder Ernteprozess nachhaltig gestaltet ist.

Am Ende ihrer Nutzung können viele biotische Materialien in Kompostieranlagen verrotten und so zu hochwertigem Kompost verarbeitet werden, wenn vorausgesetzt



	Material Gründung und Tragwerk	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/dm³]	Druck-/ Zugfestigkeit [N/mm²]	Brandverhalten [DIN EN 13501-1]	Material-Cycle-Status	weitere Recyclingpotenziale
biotische Materialien	Konstruktionsvollholz (KVH) konventionelle Forstwirtschaft	0,15	3,5–5,5	16–29 [1]	D-s2 d0 [2]		
	Brettschichtholz (BSH) konventionelle Forstwirtschaft	0,15	4,1–4,5	24–32 [1]	D-s2 d0 [3]		
metallische Materialien	Konstruktionsstahl *) (Walzprofile und Grobbleche)	40–57	7,85–7,96	340–730 [4]	A1		
mineralische Materialien	Ziegel-Hochlochmauerstein	0,5–0,68	1,2–1,6	4–28	A1		
	Kalksandstein-Mauerstein (KS) *)	0,5–1,3	1,2–2,2	4–60	A1		
	Porenbeton-Mauerstein *) für Außenwände ohne zusätzliche Wärmedämmung	0,08	0,35	2,0	A1		
	Porenbeton-Mauerstein für Außenwände mit zusätzlicher Wärmedämmung *) [6]	0,12	0,5	4,0	A1		
	Porenbeton-Mauerstein nichttragende Innenwände *)	1,4	0,5	–	A1		
	Konstruktionsbeton C12/15–C50/60 [7] [8]	2,1	2,0–2,6	12–50 [5]	A1		

*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.
[1] Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung [2] Bauteile > 20 mm dick [3] > 380 kg/m³ und > 40 mm dick [4] nur Zugfestigkeit
[5] f_{ck}, f_{cyl} = charakteristische Festigkeit von Zylindern, 150 mm Durchmesser, 30 mm Länge, Alter 28 Tage [6] bei Außenwänden zusätzliche Dämmung erforderlich
[7] ohne Stahlanteil, Expositionsklasse XC [8] MLP: RC-Gesteinskörnung Typ 1, max. Anteil an RC-Gesteinskörnung nach DIN 1045 nach der Richtlinie des DAfStB

Abb. 12: Material-Cycle-Status bei Materialien zur Gründung und Tragwerk

ist, sie bestehen aus lignin- und zellulosereichem Pflanzenmaterial. Für diesen Prozess gilt in Deutschland die Bioabfallverordnung (BioAbfV), die regelt, wie organische Abfälle verwertet werden dürfen. Allerdings gibt es bislang kaum gesetzliche Regelungen für größere Mengen biologischer Abfälle aus dem Baurückbau. Es handelt sich dabei um ein wachsendes Thema, das künftig politischen Handlungsbedarf erfordert, wenn mehr Gebäude mit biotischen Materialien entstehen und rückgebaut werden.

Ein spezieller Fall sind Baustoffe mit hohem Holzanteil. Diese eignen sich gut für eine mehrstufige Kaskadennutzung, bei der das Material zunächst mehrfach stofflich also als Baustoff verwendet wird, bevor es letztlich

energetisch verwertet wird. In der Realität allerdings landen viele dieser Holzprodukte nach der ersten Nutzung direkt in der energetischen Verwertung, etwa in Heizkraftwerken. Nach derzeitigem Stand werden solche Materialien als Bau- und Abbruchabfälle klassifiziert und fallen unter die Gewerbeabfallverordnung.

Wird jedoch Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft in mehreren Lebenszyklen stofflich genutzt, kann über den eigentlichen biologischen Kreislauf hinaus ein zusätzlicher Materialwert geschaffen werden ein neuer „Produktlebenszyklus“ innerhalb des Bauwesens. Selbst wenn die Materialien nicht aus ökologisch einwandfreier Herkunft stammen, ist eine möglichst lange Nachnutzung aus Sicht des Umweltschutzes sinnvoll und anzustreben.

Trotz dieser Möglichkeiten ist die Wieder- oder Weiterverwendung ganzer Bauteile aus biotischen Materialien bislang eher selten. Meist werden nur ausgewählte Elemente, etwa alte Dielenböden oder Eichenbalken mit sichtbarer Alterungspatina, erneut eingebaut und das häufig aus gestalterischen oder denkmalpflegerischen Gründen. Der Marktanteil solcher Bauteile bleibt jedoch gering. Umso wichtiger ist es, den Fokus auf Recyclingfähigkeit, nachhaltige Rohstoffgewinnung und kreislauffähiges Design zu legen, um das Potenzial biotischer Materialien wirklich auszuschöpfen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Fossile Materialien

Fossile Materialien stammen zwar ursprünglich ebenfalls aus biologischen Prozessen, doch ihre Entstehung dauert so lange, dass sie für menschliche Nutzungszeiträume insbesondere im Bauwesen keine erneuerbare Ressource darstellen (zum Beispiel erdölbasierte Kunststoffe). Ihre natürlichen Vorräte sind begrenzt. Zwar können einige dieser Stoffe technisch recycelt und erneut verwendet werden, doch das Potenzial für eine sinnvolle Weiterverwendung variiert stark je nach Material.

Im Bauwesen werden fossile Materialien hauptsächlich in Form von erdölbasierten Kunststoffen und Bitumen

verwendet. Kunststoffe sind in der Umwelt extrem langlebig, so können sie dort bis zu 450 Jahre bestehen bleiben, doch ihre Funktionstüchtigkeit als Baustoff nimmt deutlich früher ab. Nur selten erreichen sie die im Bausektor angestrebte Nutzungsdauer von 50 Jahren. Trotzdem werden in Deutschland über 22 % aller produzierten Kunststoffe im Bauwesen eingesetzt. Das Recyclingpotenzial dieser Materialien ist sehr unterschiedlich: Nur Thermoplaste lassen sich grundsätzlich wiederverwerten. Minderwertige Kunststoffgemische hingegen können meist nur noch verbrannt werden und das oft mit geringem energetischen Nutzen. Hochwertige Kunststoffe dagegen können mehrfach recycelt werden, bevor sie energetisch verwertet werden. Der Anteil an recyceltem Kunststoff in Bauprodukten liegt derzeit bei durchschnittlich etwa 38 %.

Auch Bitumen, ein weiteres fossiles Produkt, lässt sich zwar sortenrein gut recyceln, wird jedoch wegen seines hohen Heizwerts meist verbrannt. Insgesamt zeigt sich: Wegen der begrenzten Lebensdauer vieler fossiler Baustoffe wie Kunststoffe und Bitumen ist eine Wiederverwendung kaum praktikabel. Recycling ist zwar in einigen Fällen technisch möglich, stößt aber häufig an ökologische, qualitative und gesundheitliche Grenzen – was den nachhaltigen Einsatz dieser Materialien infrage stellt (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Mineralische Materialien

Mineralische Materialien entstehen durch nicht-biologische, natürliche Prozesse wie etwa Naturstein und gehen am Ende ihrer Nutzung wieder in den Boden über. Obwohl sie natürlichen Ursprungs sind, gelten sie aus menschlicher Perspektive als begrenzt verfügbar, da ihre Bildung sehr lange dauert. Hinzu kommt, dass sie nur eingeschränkt recycelt werden können, was ihre nachhaltige Nutzung zusätzlich erschwert.

Mineralische Baustoffe entstehen durch den Abbau natürlicher Gesteine und Sedimente, was – ähnlich wie bei metallischen Materialien – tief in gewachsene Bo-

denschichten eingreift und langfristig nicht regenerierbare Strukturen zerstört. Besonders Natursteine sind in Struktur, Farbe und Gefüge einzigartig, was sie zu Unikaten macht. Für ihre Gewinnung und Bearbeitung wird vergleichsweise wenig Energie benötigt, da sie keinen Brennprozess durchlaufen. Anders sieht es bei vielen anderen mineralischen Baustoffen wie Zement, Beton oder Kalksandstein aus: Ihre Herstellung ist äußerst energieintensiv und damit mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden.

Das Recyclingpotenzial mineralischer Materialien ist begrenzt. In der Regel können nur bis zu 50 % Sekundärmaterial in neue Produkte derselben Qualität eingebracht werden, wie etwa bei Mauersteinen oder Flachglas. Zwar gelten viele Ausgangsstoffe wie Sand oder Kies als reichlich vorhanden, doch insbesondere Bausand vor allem sogenannter Wassersand aus Flüssen, Seen und Meeren wird weltweit knapp. Durch seine spezielle Körnung ist er unverzichtbar für die Beton- und Glasherstellung.

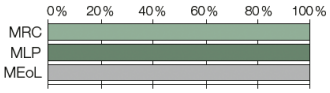
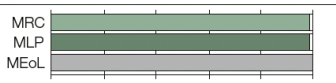
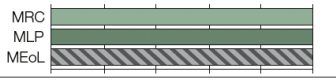
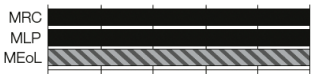
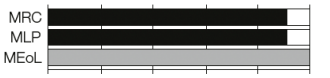
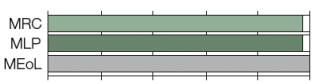
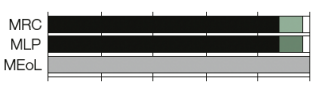
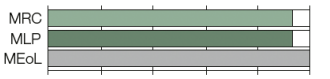
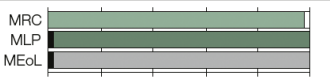
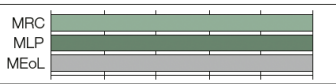
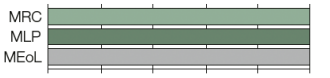
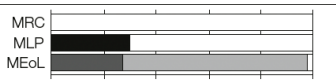
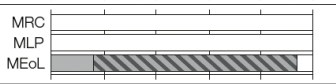
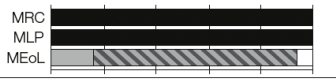
Wird mineralisches Altmaterial verwertet, entstehen dabei meist Gesteinskörnungen, die als Sekundärrohstoff etwa im Straßen- und Tiefbau eingesetzt werden. Der Bedarf ist groß, doch bislang stammen nur etwa 10 bis 15 % dieser Materialien aus Recyclingprozessen. Rund 80 % der mineralischen Baustoffe werden zwar weiterverwertet, ein Teil jedoch nur zur Verfüllung oder im Deponiebau verwendet, und der Rest landet auf Deponien. Um mineralische Stoffe möglichst nachhaltig zu nutzen, eignet sich besonders die Wiederverwendung, etwa von Natursteinplatten. Hier hängt die Wiederverwendbarkeit stark von Faktoren wie Format, Stärke und der Möglichkeit einer zerstörungsfreien Demontage ab. Bei entsprechender Qualität und Witterungsbeständigkeit lassen sich mineralische Produkte in neue Bauprojekte integrieren, was zur Schließung von Materialkreisläufen beitragen kann. Insgesamt lässt sich sagen: Nur durch gezielte Wiederverwendung können mineralische Materialien langfristig im Kreislauf gehalten werden (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Metallische Materialien

Metallische Materialien entstehen ebenso über sehr lange Zeiträume durch natürliche geologische Prozesse und würden am Ende ihres natürlichen Kreislaufs ebenfalls wieder in den Boden übergehen, wie zum Beispiel Kupfer. Obwohl ihre Vorkommen in der Natur begrenzt sind, zeichnet sie eine besonders hohe Recyclingfähigkeit aus: Sie können nahezu verlustfrei und auf gleichbleibendem Qualitätsniveau immer wieder aufbereitet und wiederverwendet werden.

Metalle kommen in der Natur nur in gebundener Form als Erze vor, deren Abbau tiefgreifende Eingriffe in die Landschaft bedeutet und wertvolle Bodenschichten zerstört. Da der Metallgehalt in Erzen meist nur bei etwa fünf Prozent liegt, entstehen bei der Förderung riesige Abraumhalden. In Deutschland werden kaum noch heimische Erze gefördert, denn das Land ist fast vollständig auf Importe angewiesen, insbesondere aus politisch und wirtschaftlich instabilen Regionen, was Aluminium, Kupfer, Stahl und Zink betrifft. Die Gewinnung von Primärmetallen verursacht zudem erhebliche Umweltbelastungen, da sie große Mengen an Wasser, Energie und Fläche benötigt und Böden, Luft sowie Gewässer belastet. Umso bedeutender ist daher das Recycling von Metallen aus dem Bestand, der sogenannten „urbanen Mine“. Diese lassen sich mit sehr hohen Rückgewinnungsraten und deutlich geringerem Energieaufwand wiederverwerten: Im Vergleich zur Primärproduktion spart Recycling etwa 95 % Energie bei Aluminium und rund 85 % bei Kupfer, was zusätzlich die CO_2-Emissionen stark reduziert.

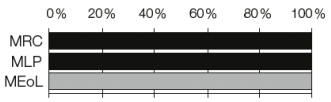
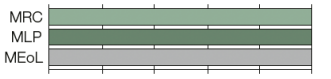
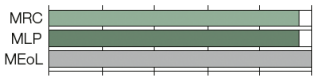
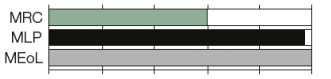
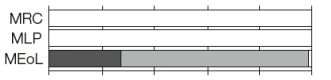
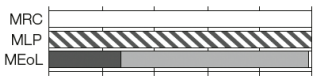
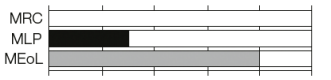
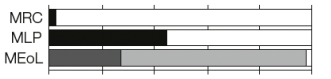
Ein großer Vorteil metallischer Baustoffe ist ihre nahezu unbegrenzte Recyclingfähigkeit ohne nennenswerten Qualitätsverlust. In Deutschland werden bereits über 80 % der Metalle in spezialisierten Verfahren wiederverwertet. Voraussetzung dafür ist allerdings eine möglichst sortenreine Trennung der Materialien. Die Rückgewinnung aus Legierungen erfordert technische Präzision und aufwendige Reinigungsverfahren, wobei moderne Analyseverfahren wie die Röntgenfluoreszenz oder Spek-

	Material Dämmungen	Anwendungsgebiet Kurzzeichen [nach DIN 4108-10]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/dm³]	Dampfdiffusionswiderstandszahl [µ]	Baustoffklasse [DIN EN 13501-1]	Lebensdauer	Material-Cycle-Status	weitere Recyclingpotenziale
biotische Materialien	Holzfaserdämmplatte (Lignin gebunden) *)	DAD, DZ, DI, DEO, WH, WTR	0,04	0,16	5	E	> 50		
	Holzspandämmung mit Soda und Molke *)	DZ, DI, WH	0,049	0,07	2	E	30		
	Korkdämmplatte *)	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR	0,037	0,11	5–10	E	> 50		
	Korkdämmgranulat *)	DZ, DEO, DES, WH, WI	0,045	0,125	5–10 1)	E	> 50 2)		
	Zelluloseflocken, boratfrei *)	DAD, DZ, DI, WH, WI, WTR	0,039–0,042 3)	0,03–0,06	2	B s2 d0 4)	50		
	Hanffasermatte mit PLA-Stützfaser *)	DAD, DZ, DI, WAB, WH, WI, WTH, WTR	0,04	0,028–0,046	1–2	E	50		
	Jutefasermatte mit PLA-Stützfaser *)	DZ, DI, WAB, WH, WI, WTR	0,038	0,034–0,04	1–2	E	50		
	Kokosfaserdämmung	DZ, DI, WH, WI, WTR	0,045–0,05	0,05–0,14	1–2	E	50		
	Schilfrohrdämmmatte	DI, DEO, DES, WAB, WAP, WI	0,061	0,19–0,225	1–2	E	20–30		
	Seegraswolle *)	DZ,DI, DEO, DES, WH, WI, WTR	0,039	0,065–0,075	1–2	E	> 50		
	Schafschurwolle *)	DZ, DI, DEO, WH, WI, WTR	0,039	0,018	1	E s1, d0	> 50		
fossiles Material	Polystyrol Hartschaum (EPS)	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WAA, WZ, WI	0,035–0,045	0,015–0,03	20–100	E	50		
mineralische Materialien	Blähton	DEO, DES	0,1–0,16	0,3–0,8	3	A1	> 50		
	Schaumglasdämmplatte	DAD, DAA, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, WTR, PW, PB	0,038–0,042	0,1–0,12	unendlich	A1	> 50 5)		
	Schaumglasschotter *)	PW, PB	0,103	0,16–0,19	2–4	A1	> 50		
	Glaswolle (KMF) *)	DZ, WH, WI	0,035	0,018–0,021	1	A1	50		

*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.
Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können. 1) keine Angabe vom Hersteller, angenommen in Anlehnung an Kork aus Neumaterial 2) angepasst an Korkplatte 3) 0,039 W/(mK) als Einblasdämmung, 0,042 W/(mK) gesprüht 4) bei Einbau 40–100 mm, > 100 mm 5) vergleichbar mit Schaumglasschotter

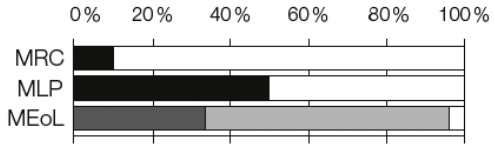
Abb. 13: Material-Cycle-Status bei Materialien zu Dämmung

tralanalysen helfen, die Zusammensetzung exakt zu bestimmen. Selbst bei der Aufbereitung von Abfällen wie Schlacken oder Filterstäuben lohnt sich der Aufwand aufgrund des hohen Materialwerts. Insgesamt gilt: Metalle zeichnen sich durch ihre Werthaltigkeit und Stabilität aus – direkte Wiederverwendung von Metallbauteilen ist jedoch selten, da Recycling einfacher und wirtschaftlich attraktiver ist (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, &

	Material Abdichtungen, Trennlagen	Dicke [mm]	Dampfdiffusionswiderstandszahl [µ]	Baustoffklasse [DIN EN 13501-1]	Lebensdauer	Material-Cycle-Status	weitere Recyclingpotenziale
biotische Materialien	Trennlage/Rieselschutz (Graupappe) *)	0,34	2–5 1)	E	>50		
	Rieselschutz (Kraftpapier) *)	0,1	400 (s_d-Wert 0,04 m)	E	50		
	Winddichtung (Schafschurwolle/Kraftpapier) *)	2	400 2)	E	50 2)		
	Dachabdichtung (pflanzliche Basis) *)	3	28000 3)	E	30		
metallisches Material	Dampfsperre (Aluminium) *)	0,05	50000000 unendlich (s_d-Wert 2500 m)	A1	>50		
fossile Materialien	Unterdeck-, Unterspann- und Fassadenbahn (PE-HD) *)	0,22	114 (s_d-Wert 0,025 m)	E	30		
	Dampfbremse (PE-LD) *) 4)	0,2	500000 (s_d-Wert >100 m)	E	50		
	Abdichtungsbahn (Bitumen) 5)	3–5	50000	E	50		
	Dachabdichtungsbahn (EPDM) *)	1,3/1,5	70000	E	>50		

*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.
Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können.
1) in Anlehnung an Holzfaserplatte im Allgemeinen 2) in Anlehnung an Kraftpapier 3) in Anlehnung an ein vergleichbares Produkt desselben Herstellers 4) MLP: Möglichkeit eines Anteils an Recyclingmaterial (vgl. Produktionen anderer Produkte) naheliegend (Einschätzung der Autoren) 5) MLP nach Herstellerangabe, alle anderen Angaben allgemein

Abb. 14:
Material-Cycle-Status bei Materialien zur Abdichtungen

	Material Verglasungen	Material-Cycle-Status	weitere Recyclingpotenziale
mineralisches Material	Floatglas für Isolierverglasungen *)		

*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.

Abb. 15:
Material-Cycle-Status bei Materialien zur Verglasungen

2.4.3 Wiederverwendung/ReUse

Ein weiterer zentraler Aspekt zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen ist die Wiederverwendung von Bauteilen. Sie steht in enger Verbindung zur Lösbarkeit von Verbindungen und zur Sortenreinheit der eingesetzten Materialien, geht jedoch über das reine Recycling hinaus: Ziel ist nicht die stoffliche, sondern die funktionale Erhaltungvon Bauteilen in möglichst unveränderter Form. Die Wiederverwendung besitzt damit ein besonders hohes ökologisches und ökonomisches Potenzial, da Energie und Ressourcenaufwand für Herstellung und Verarbeitung vollständig eingespart werden können (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Vor allem bei mineralischen Baustoffen zum Beispiel Beton oder Ziegel kann die Wiederverwendung eine sinnvolle Alternative sein, da die stoffliche Verwertung technisch oft aufwendig oder ineffizient ist. Der modulare Aufbau eines Gebäudes, also die Verwendung standardisierter, wiederkehrender Formate, fördert die planbare Demontage und Wiederverwendung einzelner Bauteile in anderen Projekten. Große, formatstabile Elemente wie Türen, Fenster oder Dachziegel eignen sich besonders gut dafür, erneut verbaut zu werden (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Aktuell bleibt die realisierte Wiederverwendung noch stark eingeschränkt. Die Forschung Rakhshan zeigt, dass die Praxis durch eine Vielzahl an Barrieren geprägt ist. Darunter sind technische Unsicherheiten, wirtschaftliche Hemmnisse, regulatorische Vorgaben und mangelnde Akzeptanz bei den Akteuren. Insbesondere das Zusammenspiel aus wahrgenommenem Risiko und rechtlichen Rahmenbedingungen ist entscheidend – solange Planende Bauteile weder für normkonform noch risikofrei halten, bleibt deren Wiederverwendung selten (Rakhshan, Morel, Alaka, & Charef, 2020).

Eine besonders wichtige Rolle für die praktische Umset-



Abb. 16:
Recherchierte Bauteilbörsen und Handels-unternehmen

zung der Wiederverwendung spielen heute Bauteilbörsen. Diese Plattformen bieten Materialien aus Rückbauprojekten oder Restbeständen zur Wiederverwendung an – sowohl online als auch stationär. Planende können dort gezielt nach benötigten Bauteilen suchen oder eigene Bedarfe anmelden, die bei Verfügbarkeit gemeldet werden. Bauteilbörsen fördern nicht nur die Materialvermittlung, sondern auch den Wissenstransfer und die Beratung zum Wiedereinbau. Zudem unterstützen sie die lokale Kreislaufwirtschaft, da der Transport meist regional erfolgt (Vandamme, 2025).

Der Vorteil gebrauchter Materialien liegt häufig in ihrem günstigen Preis und ihrer Verfügbarkeit in kleinen Mengen. Gipskartonplatten, Fenster, Türen oder Backsteine lassen sich nach entsprechender Prüfung problemlos erneut einsetzen. Besonders historische Bauteile bieten zudem einen gestalterischen Mehrwert durch ihre Patina und Materialqualität. Damit das Sourcing erfolgreich verläuft, ist eine frühzeitige Materialanalyse im Rückbauprozess entscheidend. Viele Bauteilbörsen übernehmen dafür die Demontage direkt oder arbeiten mit sozialen Projekten zusammen. In Deutschland spielen Plattformen wie restado, die Bauteilbörse Berlin-Brandenburg, die Bauteilbörse Bremen oder die Concular-Bauteilbörse eine zentrale Rolle. Letztere verbindet klassische Bauteilvermittlung mit digitalen Werkzeugen zur Rückbauplanung und Materialprüfung und ist damit ein Ansatz, der zirkuläres Bauen wirtschaftlicher und effizienter gestaltet (Shop Concular, 2025).

Neben den gemeinnützigen Börsen existieren auch Handelsunternehmen, die sich auf den Rückbau historischer Gebäude spezialisiert haben. Hier stehen nicht Nachhaltigkeit, sondern kultureller und ästhetischer Wert im Vordergrund. Die Materialien werden oft aufwendig bearbeitet, gelagert und zu hohen Preisen weiterverkauft, die häufig im internationalen Handel vertrieben werden. Anders als bei Bauteilbörsen richtet sich das Angebot vorrangig an Endkunden (B2C), etwa für exklusive Innenausbauten (Vandamme, 2025).

Insgesamt zeigt sich: Die Wiederverwendung von Bauteilen ist eine zentrale, aber noch nicht flächendeckend erschlossene Ressource der Kreislaufwirtschaft. Ihre Umsetzung hängt von frühzeitiger Planung, gezielter Organisation, rechtlicher Klarheit und digitalen Hilfsmitteln ab. Bauteilbörsen, digitale Gebäudedaten und modulare Konstruktionen sind dabei entscheidende Hebel, um Materialkreisläufe im Bauwesen wirksam zu schließen. Wenn es gelingt, diese Systeme zu verstetigen, kann die Wiederverwendung vom Nischenphänomen zur tragfähigen Strategie im zirkulären Bauen werden.

2.5 Kostenanalyse

Die Wirtschaftlichkeit ist ein zentrales Argument für die Umsetzung zirkulärer Strategien im Bauwesen insbesondere im Hinblick auf Instandsetzung, Rückbau und Materialverwertung. Im Gegensatz zu herkömmlichen Planungs- und Bauweisen verschiebt sich im zirkulären Bauen der Blick von den reinen Baukosten hin zu einer lebenszyklusorientierten Kostenbetrachtung, bei der auch Instandhaltungs-, Rückbau- und Entsorgungskosten sowie potenzielle Materialwerte mitgedacht werden. Dabei zeigt sich: Wer frühzeitig auf trennbare, langlebige und wiederverwertbare Materialien setzt, kann nicht nur ökologische, sondern auch wirtschaftliche Vorteile erzielen.

Diese Perspektivverschiebung ist eingebettet in einen grundlegend neuen Planungsansatz. Der zirkuläre Planungsprozess stellt eine Abkehr vom klassischen linearen Modell dar. Gebäude werden nicht mehr als fertige, abgeschlossene Produkte gedacht, sondern als dynamische, wandelbare Systeme, deren Bauteile über viele Lebenszyklen hinweg genutzt, angepasst und wiederverwendet werden können. Diese Herangehensweise erfordert nicht nur eine vorausschauende Planung von Rückbau, Wiederverwendung und Materialverfügbarkeit, sondern auch eine Verschiebung klassischer Leistungsphasen in frühere Planungsabschnitte sowie eine enge interdiszip-

linäre Zusammenarbeit. Mithilfe digitaler Werkzeuge wie Materialpässen, Bauteilkatalogen oder Erntekarten können Materialien dokumentiert und bereits im Entwurf in zirkuläre Prozesse eingebunden werden und das bis hin zur Organisation von Transport, Lagerung, Instandhaltung und Demontage (dena - Gebäudeforum Klimaneutral).

Diese Denkweise verändert auch die ökonomische Bewertung: Anstelle einmaliger Baukosten rückt der langfristige Wertbeitrag der Materialien in den Vordergrund. Modelle wie das Value Hill Modell verdeutlichen, dass ein Produkt seinen ökonomischen Wert nicht mit dem ersten Einbau verliert, sondern durch gezielte Rückgewinnung, Aufbereitung und Wiederverwendung erneut wirtschaftlich nutzbar wird. Es entstehen neue Marktmechanismen, in denen etwa Rückbauunternehmen, Plattformen für Wiederverkauf oder Hersteller mit Rücknahmesystemen Teil eines zirkulären Geschäftsmodells werden und folglich mit direkter Auswirkung auf Kosten, Erlöse und Materialflüsse (dena - Gebäudeforum Klima-

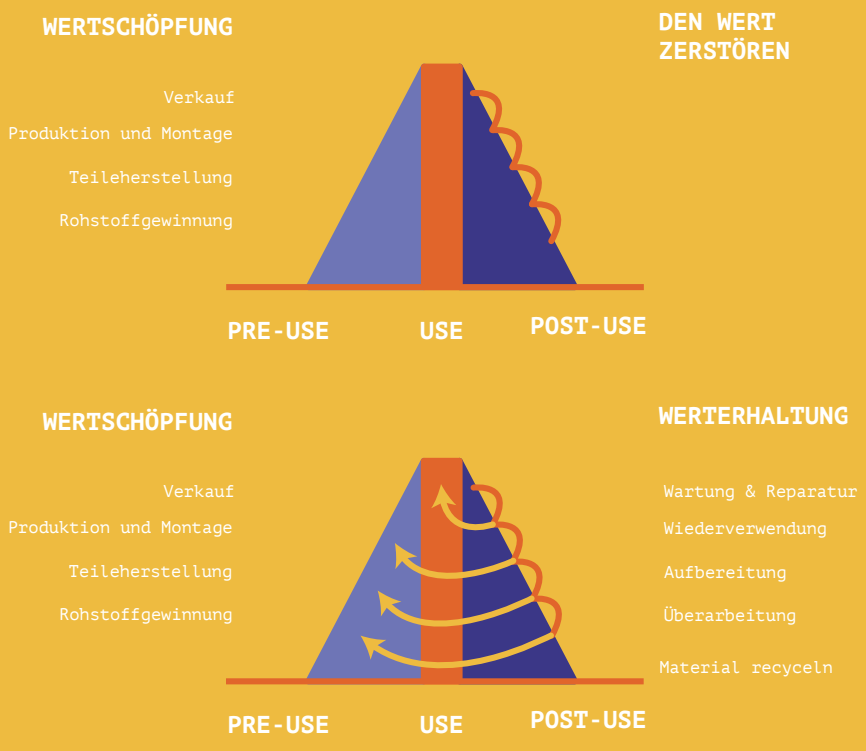


Abb. 17: Value-Hill-Prinzip zum Werterhalt von Baustoffen

neutral).

Im Folgenden wird gezeigt, welche rechtlichen Rahmenbedingungen stehen, um das Potenzial des Rückbauens und die damit verbundenen Materialflüsse nachvollziehen zu können. Im Anschluss wird dann dargestellt, weshalb auch die Rückbaukosten von Bedeutung sind, wenn es um die Planung eines zirkulären Gebäudes geht.

2.5.1 Rechtliche Grundlagen

Der rechtliche Rahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ist in Deutschland vielschichtig und wird sowohl durch europäische als auch durch nationale und länderspezifische Regelwerke geprägt. Eine zentrale Rolle spielt auf EU-Ebene die Abfallrahmenrichtlinie, die eine fünfstufige Abfallhierarchie vorgibt: Vorrang haben Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling, gefolgt von sonstiger Verwertung und Beseitigung. Für Bau- und Abbruchabfälle ist eine Verwertungsquote von mindestens 70 % vorgeschrieben. Ergänzend fordert die Richtlinie Maßnahmen zur erweiterten Herstellerverantwortung sowie die Förderung des selektiven Rückbaus. Letzterer zielt auf eine sortenreine Trennung von Materialien bereits auf der Baustelle ab, um eine hochwertige stoffliche Verwertung zu ermöglichen. Die jüngste Überarbeitung des EU-Protokolls zum Umgang mit Bauabfällen legt zudem Wert auf Vorab-Materialaudits, Rückverfolgbarkeit der Stoffströme und klare Trennpflichten (Art. 11, Abs. 1; European Commission, 2008/2018).

In Deutschland ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) das zentrale Regelwerk zur Umsetzung dieser Vorgaben (Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2024). Es schafft unter anderem die rechtliche Grundlage zur Förderung des Einsatzes von Rezyklaten durch Verordnungen und stärkt die Pflichten öffentlicher Auftraggeber im Bereich der nachhaltigen Beschaffung. Flankierend regeln die Abfallverzeichnisverordnung (AVV) die Zuordnung und Entsorgungspflicht von Abfällen sowie die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) die getrennte Erfassung von zehn definierten Baustofffraktionen. Ausnahmen sind unter engen Bedingungen möglich, etwa bei Platzmangel oder wirtschaftli-

cher Unzumutbarkeit. Für vorbehandelte Abfälle gelten ebenso Mindestanforderungen: eine Sortierquote von mindestens 80 % und eine Recyclingquote von mindestens 30 %. (vgl. § 6 Abs. 1, 3 GewAbfV; Umweltministerium Niedersachsen, 2024; Deutscher Bundestag Drucksache 20/13950, 2024)

Ergänzend sind spezielle Regelungen wie die Altholzverordnung und die Bioabfallverordnung zu nennen, wobei letztere bislang keine Anwendung auf biobasierte Bauabfälle findet. Die Altholzverordnung klassifiziert Holzabfälle in vier Kategorien und regelt deren Verwertung, erkennt jedoch stoffliche und energetische Nutzung als gleichwertig an, was einer kaskadierten Nutzung bislang entgegensteht (Bundesministerium, 2020).

Besonders praxisrelevant ist das Rückbaurecht, das in den Landesbauordnungen sowie in technischen Normen wie DIN 18007, DIN 18459 und der VDI-Richtlinie 6210 verankert ist. Diese Regelwerke definieren Anforderungen an Planung, Sicherheit und Durchführung von Abbruch- und Rückbauarbeiten. Der Fokus liegt dabei auf Arbeitsschutz und technischer Ausführung; Aspekte der Ressourcenschonung werden überwiegend über das Abfallrecht gesteuert. Solange dort keine höheren Anforderungen an die stoffliche Qualität gestellt sind, bleibt der selektive Rückbau vielfach freiwillig.

In Nordrhein-Westfalen konkretisiert das Landeskreislaufwirtschaftsgesetz diese Vorgaben und schreibt bei Bauvorhaben ab 500 m^3 Abfall ein Entsorgungskonzept vor. Öffentliche Bauherren sind verpflichtet, Recyclingmaterialien zu bevorzugen; ergänzende Erlasse fördern den Einsatz mineralischer Rezyklate im Hoch- und Tiefbau (Ministerium für Umwelt, NRW, 2025).

2.5.2 Wirtschaftlichkeit von Instandsetzung und Rückbau

Die klassische Projektkostenberechnung stößt in diesem Kontext an ihre Grenzen. Zwar lassen sich viele Material- und Montagekosten mit Indizes wie dem BKI (Baukostenindex) abbilden, doch neuartige Produkte, modulare Systeme oder gebrauchte Bauteile erfordern individuelle Kalkulationen. Auch die Lebensdauern von Bauteilen

werden im zirkulären Modell differenzierter betrachtet, da sie nicht mehr zwingend mit dem Nutzungsende eines Gebäudes gleichzusetzen sind. Stattdessen können Bauteile nach Instandsetzung, Umnutzung oder Wiederverkauf weiter zirkulieren. Dieser Betrachtungsrahmen hat bislang wenig Eingang in klassische Wirtschaftlichkeitsanalysen gefunden.

Auch bei den Rückbaukosten zeigt sich ein neues Bild. Zwar existieren noch keine standardisierten Indizes, doch lassen sich Kosten mithilfe von Angebotspreisen und Erfahrungswerten, wie beispielweise aus dem Recycling Atlas oder BKI, schätzen (BKI Baukosten Online, 2025). Dabei ist entscheidend, ob Materialien sortenrein rückbaubar, schadstofffrei und wiederverkäuflich sind. Während schadstoffhaltige Baustoffe wie HBCD-Polystyrol hohe Entsorgungskosten verursachen, lassen sich sortenreine Metalle oder Massivholzbauteile mitunter sogar gewinnbringend vermarkten. Gebäude werden so zu urbanen Rohstofflagern, die wirtschaftlich wertvoller sein können, als ihre reinen Baukosten vermuten lassen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Gerade im zirkulären Planungsansatz macht es besonders viel Sinn, den Blick nicht auf klassische Baukosten allein zu beschränken, sondern ihn um eine erweiterte Kosten-Nutzen-Perspektive zu ergänzen. Traditionelle Wirtschaftlichkeitsberechnungen konzentrieren sich in der Regel auf Investitionskosten, Instandhaltungsintervalle sowie Rückbaukosten und erfassen damit nur einen Ausschnitt der tatsächlichen ökonomischen Wirkzusammenhänge über den Lebenszyklus eines Gebäudes.

Im zirkulären Bauen hingegen werden Materialien nicht als einmalige Ausgaben, sondern als dauerhafte Wertträger verstanden, deren Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Veräußerung nach Ende der Nutzung echte Erlöspotenziale bietet. Wer also lediglich die Herstellung und Instandsetzung kalkuliert, ohne mögliche Verwertungserlöse oder Rückbaugewinne zu berücksichtigen, übersieht einen zentralen Hebel für die wirtschaftliche Tragfähigkeit zirkulärer Baukonzepte (Hillebrandt,

Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Besonders bei sortenrein rückbaubaren Materialien von beispielsweise Metallen, Massivholz oder historischen Bauteilen zeigen sich erhebliche Unterschiede im Vergleich zur klassischen Betrachtungsweise: Während viele dieser Materialien einen hohen Wiederverkaufswert haben, verlieren schwer trennbare oder schadstoffbelastete Stoffe vollständig an Wert und erzeugen sogar zusätzliche Entsorgungskosten. Die stoffliche Qualität, die Möglichkeit der sortenreinen Trennung und der Marktwert der zurückgewonnenen Materialien entscheiden somit maßgeblich darüber, ob ein Rückbau zu einer finanziellen Belastung oder zu einer Ressource wird. Wie sich dieser wirtschaftliche Unterschied konkret auswirken kann, zeigt folgendes Rechenbeispiel am Material Aluminium:

Ein Gebäudeteil enthält 2 Tonnen Aluminium, das zum Zeitpunkt der Errichtung zu einem Marktpreis von 2.500 €/t angeschafft wurde. Die Investitionskosten für das Aluminium betragen demnach 5.000 €.
Nach 30 Jahren soll das Gebäude rückgebaut werden. Durch vorausschauende Planung wurde das Aluminium sortenrein und ohne Schadstoffe eingebaut – und lässt sich problemlos wieder ausbauen. Der aktuelle Marktwert für Sekundäraluminium liegt nun bei 2.200 €/t.

Verwertungserlös:
2.200 €/t × 2 t = 4.400 €

Die Rückbaukosten für das Aluminium inkl. Ausbau, Transport und Zwischenlagerung belaufen sich auf 800 €.

Ergebnis:
Der Rückbau verursacht keine Netto-Kosten, sondern bringt sogar einen ökonomischen Überschuss von 3.600 € (4.400 € Erlös – 800 € Rückbauaufwand).

Wäre das gleiche Material als Verbundstoff verbaut worden, hätte es aufgrund der notwendigen Trennung und Entsorgung Zusatzkosten von ca. 1.200 € verursacht und

somit wäre statt eines Erlöses somit ein negativer Saldo von 1.200 € entstanden.

Die wirtschaftliche Betrachtung zirkulären Bauens verlangt daher eine ganzheitliche Kosten-Nutzen-Bilanzierung, in der Verwertungserlöse als wirtschaftlicher Gegenpol zu Investitionen, Wartung und Rückbau erfasst werden. Nur so lässt sich tatsächlich abschätzen, welche Bauteile langfristig nicht nur nachhaltig, sondern auch wirtschaftlich vorteilhaft sind. In diesem Sinne ist der Rückbau kein Entsorgungsvorgang mehr, sondern ein zentraler Moment der Wertabschöpfung innerhalb eines zirkulären Gebäudelebenszyklus (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Besonders deutlich wird dies im Vergleich zu Materialien, die nicht kreislauffähig sind. Im Gegensatz zu rückbaubaren oder verwertbaren Stoffen verursachen konventionelle Baustoffe, die sich nicht in den Materialkreislauf zurückführen lassen, hohe und tendenziell weiter steigende Entsorgungskosten. Insbesondere Stoffe, die sich nicht sortenrein trennen lassen oder verunreinigt sind, stellen ein erhebliches Kostenrisiko dar. Zwischen 2000 und 2016 stiegen etwa die Entsorgungskosten für Baumischabfälle um mehr als 100 %, für verunreinigtes Holz sogar um über das Zehnfache. Selbst Gips oder Gipskarton erfuhren in diesem Zeitraum eine Verachtfachung der Entsorgungskosten. Diese Entwicklungen zeigen klar: Nicht nur die Herstellung eines Baustoffs ist kostenintensiv, auch sein Lebensende kann zur wirtschaftlichen Belastung werden, wenn keine stoffliche Rückführung möglich ist (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Ein weiterer, zunehmend relevanter Faktor ist der limitierte Deponieraum, der in Zukunft als massiver Kostentreiber wirken dürfte. Studien aus mehreren Bundesländern prognostizieren, dass die derzeit genehmigten Deponiekapazitäten spätestens bis 2030 ausgeschöpft sein werden. Die Errichtung neuer Deponien stößt nicht nur auf gesellschaftlichen Widerstand, sondern scheitert häufig auch an der Flächenverfügbarkeit. Die daraus resultierenden langen Transportwege und begrenzten An-

nahmekapazitäten erhöhen die Entsorgungskosten zusätzlich. In der Konsequenz wird deutlich: Nicht-zirkuläre Materialien werden langfristig nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch untragbar (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggwies, 2021).

Gleichzeitig macht der zirkuläre Ansatz deutlich, dass versteckte Kosten vor allem für spätere Reparaturen, Wartung oder problematische Entsorgung frühzeitig mitgedacht werden müssen. Die derzeit gängige Praxis, Materialien vor allem nach Anschaffungskosten zu bewerten, greift hier zu kurz. Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Wiederverwertbarkeit müssen Teil einer erweiterten ökonomischen Bewertung werden, die über kurzfristige Budgetlogik hinausgeht.

Die besondere wirtschaftliche Bedeutung im zirkulären Bauen liegt somit in der stofflichen Trennung: Wer Materialien so plant und verbaut, dass sie sortenrein rückgebaut werden können, kann nicht nur Entsorgungskosten vermeiden, sondern sogar Rückbaugewinne realisieren. Umgekehrt verursachen schlecht trennbare oder nicht recyclingfähige Materialien künftig hohe Zusatzkosten. Die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit von Gebäuden hängt daher nicht mehr nur von der Bauweise oder den Betriebskosten ab, sondern maßgeblich auch vom Materialdesign mit Blick auf Rückbau und Wiederverwertung.

2.6 Anforderungen an den Schulbau

Diese Anforderungen betreffen unter anderem Aspekte wie Brandschutz, Flächenanforderungen und sonstige Bedingungen. Sie dienen als Grundlage für die funktionale und nachhaltige Gestaltung von Gebäuden und ermöglichen eine flexible Anpassung an verschiedene Nutzungsszenarien. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Felix-Fechenbach-Berufskollegs sollen diese Regelanforderungen als Basis für die Planung neuer Nutzungskonzepte dienen, um eine zukunftsorientierte und bedarfsgerechte Gebäudeorganisation zu gewährleisten.

2.6.1 Landesbauordnung

Die baulichen Anforderungen an Schulgebäude in Deutschland ergeben sich aus einem Zusammenspiel von Landesbauordnungen, Schulbaurichtlinien, technischen Normen und Vorgaben der Unfallversicherungsträger. Während die Landesbauordnungen (LBO) den rechtlichen Rahmen setzen, konkretisieren die Schulbaurichtlinien die besonderen Anforderungen an Schulgebäude, insbesondere im Hinblick auf Brandschutz, Raumorganisation, Rettungswege und Sicherheitsstandards. Ziel ist es, sichere, funktionale und zugleich pädagogisch zeitgemäße Lernorte zu schaffen.

Ein zentrales Element dieser Anforderungen betrifft den Brandschutz. Unterrichtsräume müssen grundsätzlich als baulich abgeschlossene Einheiten mit mindestens zwei voneinander unabhängigen Rettungswegen geplant werden. Diese dürfen je nach baulicher Situation auch über Balkone oder Dachflächen geführt werden. Moderne Lernbereiche, etwa in Form von Clustern oder offenen Lernlandschaften, unterliegen denselben Anforderungen. Sichtbeziehungen innerhalb solcher Bereiche sind ausdrücklich gewünscht, da sie die Früherkennung potenzieller Brandgefahren erleichtern.

Die Anforderungen an tragende und raumbildende Bauteile orientieren sich meist an der Gebäudeklasse 5 (GK5), die in Schulbauten üblich ist. Tragwerke in Lernbereichen müssen mindestens feuerhemmend (F30), in vielen Fällen sogar hochfeuerhemmend (F60) ausgeführt werden. Trennwände, etwa zur Abgrenzung von Bereichen mit erhöhter Brandgefahr, erfordern in der Regel eine Feuerwiderstandsklasse von F90. Brandwände müssen mindestens 60m voneinander entfernt sein, um eine horizontale Brandweiterleitung zu verhindern. In einem Bereich von bis zu 2,50m zur Brandwand sind Öffnungen wie Fenster oder Türen unzulässig; erst ab einer größeren Entfernung sind sie zulässig, wenn sie entsprechende feuerhemmende Maßnahmen aufweisen.

Auch die Fluchtwegsicherheit ist ein wesentlicher Bestandteil der baulichen Planung. Die maximal zulässige Länge eines Rettungswegs beträgt in der Regel 35m. Bei Stichfluren ist sie auf 15m, bei normalen Fluren auf bis zu 25m begrenzt. Notwendige Flure und Hauptgänge müssen je nach Nutzung ausreichend breit ausgelegt sein, was mindestens 1,20m, bei stark frequentierten Bereichen bis zu 1,50m entspricht. Türen von Unterrichts- oder Aufenthaltsräumen, die in Fluchtwege münden, müssen ebenfalls entsprechende Breiten aufweisen und dürfen nicht durch Mobiliar oder bauliche Elemente blockiert werden. Aufenthaltsräume, in denen sich regelmäßig mehr als 100 Personen aufhalten, sind mit zwei möglichst weit voneinander entfernten Ausgängen auszustatten.

Auch Geländerhöhen sind normiert: Sie müssen in Treppenbereichen mindestens 1,10m, in anderen Bereichen mindestens 0,90m betragen. Dauerhaft verbaute Möbel in Fluren sind zulässig, wenn sie fest mit dem Boden verbunden sind und die vorgeschriebenen Rettungswege nicht beeinträchtigen. Zur besseren Orientierung können unterschiedliche Bodenfarben oder taktile Leitsysteme eingesetzt werden.
In der Praxis führt die Umsetzung dieser Anforderungen jedoch häufig zu Herausforderungen, insbesondere bei modernen pädagogischen Konzepten wie offenen Lern-

landschaften oder Clusterstrukturen. Viele geltende Vorschriften basieren noch auf dem traditionellen Modell der „Flurschule“ und lassen sich nur schwer mit innovativen Raumkonzepten in Einklang bringen. Einige Bundesländer haben deshalb ihre veralteten Schulbaurichtlinien abgeschafft oder überarbeitet. Ziel ist es, die baurechtlichen Grundlagen so weiterzuentwickeln, dass sie flexible, zukunftsfähige Schulbauten ermöglichen und das ohne dabei die sicherheitstechnischen Anforderungen zu vernachlässigen.

Zusammenfassend zeigt sich: Die baulichen Regelwerke stellen hohe Anforderungen an Sicherheit, Funktionalität und Struktur von Schulgebäuden. Gleichzeitig besteht ein wachsender Bedarf an Anpassung, um neuen pädagogischen Konzepten gerecht zu werden und den Wandel hin zu offenen, inklusiven und flexiblen Lernumgebungen auch baulich zu unterstützen (Ministerium für Heimat, 2020).

2.6.2 Typologische Anforderungen

Ein leistungsfähiger Schulbau zeichnet sich durch differenzierte Raumkonzepte aus, die über den klassischen Klassenraum weit hinausgehen. Die Anforderungen an die räumliche Gestaltung orientieren sich heute an vielfältigen pädagogischen Konzepten, die individualisiertes, kooperatives und projektorientiertes Lernen ermöglichen. Dementsprechend müssen die verschiedenen Raumarten im Schulbau funktional aufeinander abgestimmt und für unterschiedliche Nutzungsszenarien ausgelegt sein.

Allgemeine Lern- und Unterrichtsbereiche
Moderne Lernräume sollen nicht nur den Frontalunterricht ermöglichen, sondern auch Differenzierung, Gruppenarbeit, Ruhephasen und kreative Prozesse räumlich unterstützen. Sie müssen flexibel nutzbar und technisch

sowie atmosphärisch hochwertig ausgestattet sein. Neben dem klassischen „Klassenraum Plus“-Modell, bei dem der Unterrichtsraum durch angrenzende Gruppenräume oder Flurflächen erweitert wird, gewinnt das sogenannte Cluster-Modell an Bedeutung. Dabei werden mehrere Unterrichts- und Differenzierungsräume zu einer sozialräumlichen Einheit zusammengefasst, ergänzt durch Team-, Lager- und Rückzugsräume. Sichtbeziehungen zwischen den Bereichen schaffen Transparenz und fördern eine offene Lernatmosphäre.

Noch offener ist das Konzept der Lernlandschaft, das auf feste Raumgrenzen verzichtet und unterschiedliche Lernzonen in ein gemeinsames Raumgefüge integriert. Dieses Modell nutzt auch Erschließungsflächen aktiv mit und eignet sich besonders für selbstorganisiertes Lernen. Für all diese Konzepte gelten hohe Anforderungen an Akustik, Beleuchtung, IT-Infrastruktur und Mobiliar. Die Mindestfläche pro Schüler*in sollte inklusive Differenzierungsflächen 3,6 m² nicht unterschreiten, um angemessene Lernbedingungen zu gewährleisten. Gleichzeitig

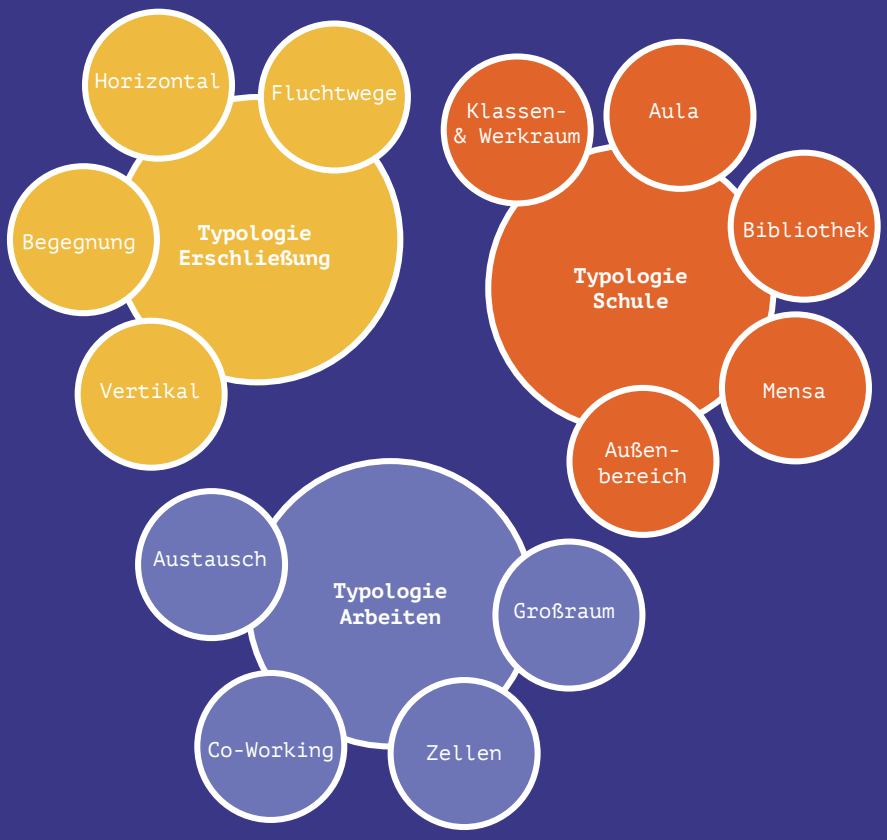


Abb. 18: Prinzipskizze zu verschiedenen Typologiefeldern

ermöglichen Synergieeffekte durch Raumüberlagerung und Mehrfachnutzung eine wirtschaftliche Flächenplanung (Montagsstiftung Schulbauleitlinien, 2025).

Technikräume

Die Technikräume in Schulen müssen als vielseitige Werkstätten ausgelegt sein, die unterschiedliche handwerkliche Arbeitsformen beispielweise Holz-, Metall-, Elektro- oder Textiltechnik – räumlich abbilden können. Sie sollen Gruppenarbeit ebenso zulassen wie individuelles Arbeiten und benötigen separate Lager- und Nebenräume für Materialien und Produkte. Sicherheitsanforderungen stehen hier im Vordergrund: Maschinen, die nur eingeschränkt von Schülerinnen genutzt werden dürfen, müssen in separaten, beaufsichtigbaren Räumen untergebracht sein. Zudem sind Sichtbeziehungen zwischen den Werkstätten wünschenswert, um Aufsicht und Austausch zu fördern. Schallschutz, Staubschutz und eine bevorzugte Lage im Erdgeschoss mit direktem Zugang zu Außenflächen für Materialanlieferung sind weitere zentrale Anforderungen. Für Technikräume wird ein Flächenbedarf von 1,6 bis 2,4 m^2 pro Schülerin empfohlen. Dieser Wert umfasst die eigentliche Arbeitsfläche sowie erforderliche Nebenräume für Lagerung, Maschinen und Sicherheitseinrichtungen (Montagsstiftung Schulbauleitlinien, 2025).

Gemeinschaftsbereiche

Gemeinschaftsflächen wie Foyers, Aulen, Mensen, Cafeterien und Bibliotheken übernehmen im modernen Schulbau eine wichtige soziale und funktionale Rolle. Sie sind Begegnungszonen, Veranstaltungsorte und Lernorte zugleich. Ihre Gestaltung muss multifunktional sein, mit variabler Möblierung, angepasster Akustik und Medientechnik. Eine gute Anbindung an zentrale Schulbereiche ist ebenso wichtig wie eine offene Gestaltung, die Kommunikation und Aufenthaltsqualität fördert. Die Aula kann dabei sowohl als Ort für Versammlungen und Aufführungen als auch für Unterricht in größeren Gruppen genutzt werden. Die Schulbibliothek wird zunehmend als „dritter Lernort“ verstanden: Sie bietet eine ruhige Atmosphäre mit Zonen für Einzelarbeit, Gruppenarbeit und in-

formelles Lernen. Für diese Gemeinschaftsbereiche wird ein Flächenbedarf von 1,2 bis 2,0 m² pro Schüler*in empfohlen. Für die Mensa kommen zusätzlich 1,5 bis 1,8 m² pro Essplatz hinzu, wobei durch gute Organisation auch höhere Auslastungen realisierbar sind (Montagsstiftung Schulbauleitlinien, 2025).

Außenbereiche

Außenflächen sind integraler Bestandteil des pädagogischen Gesamtkonzepts. Sie dienen nicht nur der Bewegung und Erholung, sondern auch dem sozialen Lernen und der Naturerfahrung. Die Gestaltung soll vielfältige Zonen von offenen Bewegungsflächen über ruhige Rückzugsorte bis hin zu pädagogisch nutzbaren Bereichen wie Schulgärten oder Werkflächen im Freien umfassen. Überdachte Terrassen, Arkaden und barrierefreie Erschließung verbessern die Nutzbarkeit bei jedem Wetter. Wichtig ist die funktionale Verknüpfung mit den Innenräumen wie beipsielsweise durch direkte Zugänge aus der Mensa oder aus Werkräumen sowie eine gezielte Begrünung zur Verbesserung des Mikroklimas. Obwohl keine fixe Quadratmeterzahl pro Schüler*in vorgegeben ist, machen die Leitlinien deutlich, dass die Außenflächen großzügig und vielfältig nutzbar sein müssen. Altersgerechte Zonierung, inklusive Gestaltung und wetterunabhängige Bereiche sind zentrale Planungsgrundsätze. Die funktionale Einbindung in den Schulalltag ist dabei ebenso wichtig wie die Qualität der Aufenthaltsbereiche (Montagsstiftung Schulbauleitlinien, 2025).

Die Anforderungen an die verschiedenen Raumarten im Schulbau zeigen: Ein zukunftsfähiges Schulgebäude ist mehr als die Summe seiner Klassenzimmer. Es besteht aus einem differenzierten Gefüge funktional abgestimmter Räume, die sowohl den pädagogischen als auch den sozialen und organisatorischen Anforderungen des Schulalltags gerecht werden. Nur durch eine ganzheitliche, flexible und nutzerorientierte Raumplanung lassen sich inklusive, ganztägig nutzbare und lernförderliche Schulwelten verwirklichen. Flächenangaben dienen hierbei nicht nur der Orientierung, sondern sind ein zentrales Instrument zur Qualitätssicherung pädagogischer Architektur.

Foto: https://www.proholz.at/holzbauten/architektur/k118-in-winterthur

3 FALLSTUDIEN ANALYSE

Fallstudien bieten die Möglichkeit, abstrakte Konzepte in konkreten architektonischen und konstruktiven Lösungen zu überprüfen. Sie zeigen, wie zirkuläre und adaptive Strategien in unterschiedlichen Kontexten umgesetzt wurden und welche gestalterischen, materiellen oder strukturellen Entscheidungen dabei zum Tragen kamen. Dieses Kapitel untersucht historische und zeitgenössische Beispiele adaptiver und zirkulärer Architektur, um daraus übertragbare Prinzipien und typische Herausforderungen für den Umgang mit dem Bestand abzuleiten. Die Analyse bildet eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung eigener Entwurfsstrategien.

3.1 Historische Entwicklung des adaptiven Bauens

Die Praxis der Umnutzung von Bauwerken reicht bis in die Antike zurück, wo etwa römische Tempel zu christlichen Kirchen umgewandelt wurden. Während des Mittelalters spielte die Wiederverwendung von Materialien und Strukturen eine zentrale Rolle, insbesondere aufgrund begrenzter Ressourcen und sich wandelnder gesellschaftlicher Bedürfnisse. Die Moderne brachte mit der Industrialisierung neue Herausforderungen: Veraltete Fabriken und Infrastrukturen mussten an veränderte Produktionsweisen angepasst werden.

Ein bedeutender Wendepunkt war das 20. Jahrhundert, als sich mit der Einführung des Denkmalschutzes und der Entwicklung von Theorien zur Erhaltung historischer Bausubstanz die adaptive Wiederverwendung als eigenständige Disziplin etablierte. In den 1970er Jahren wurde der Begriff „adaptive reuse“ verstärkt verwendet, insbesondere im Zusammenhang mit dem wachsenden Bewusstsein für Umwelt- und Klimaschutz (Wong, Adaptive Reuse in Architecture: A typological index, 2023).

Der Schutz historischer Bauwerke und Denkmäler gewann vor allem seit dem 19. Jahrhundert an Bedeutung. Während Architekten wie Viollet-le-Duc die Denkmalpflege durch stilistische Rekonstruktionen prägten, entwickelten Kritiker moderne Erhaltungskonzepte, die den authentischen Bestand stärker in den Fokus rückten. Adaptive Reuse unterscheidet sich von der traditionellen Denkmalpflege durch einen flexibleren, oft wirtschaftlich motivierten Ansatz, der eine funktionale Transformation ermöglicht (Wong, Adaptive Reuse in Architecture: A typological index, 2023).

Es gibt zahlreiche Beispiele für gelungene Adaptive Reuse-Projekte. Die Mezquita-Catedral de Córdoba ist ein eindrucksvolles Beispiel für die mehrfache Umnutzung eines Bauwerks: Ursprünglich ein römischer Tempel, wurde sie später zur christlichen Kirche, dann zur Mo-

schee und schließlich wieder zur Kirche. In Paris wurde der ehemalige Bahnhof Gare d'Orsay im Jahre 1986 in ein renommiertes Museum für impressionistische Kunst umgewandelt. Die Zeche Zollverein in Essen, einst eine bedeutende Industrieanlage, wurde nach ihrer Stilllegung im Jahre 1986 zum UNESCO-Weltkulturerbe erklärt und zu einem Kultur- und Veranstaltungszentrum transformiert. Ein Beispiel ist da vor allem der Erfindergeist und typischen Prozess der adaptiven Architektur in der historischen Entwicklung, der sich in der Umsetzung der Planung in dem Salzspeicher zeigt.

3.1.1 Anarchitects

Ein künstlerisches Beispiel für Adaptive Reuse lieferte Gordon Matta-Clark, der in seinem Projekt ein verlassenes Haus zerschnitt und so eine kritische Reflexion über die Vergänglichkeit von Architektur schuf. Gordon Matta-Clark gilt als einer der einflussreichsten Künstler der Nachkriegszeit. In den 1970er Jahren begann er mit sei-



Abb. 19: Gordon Matta-Clark während einer Subtraktion

nen berühmten „Cuts“ in verfallenen Gebäuden des New Yorker Stadtteils Bronx. Durch aufwendige Eingriffe, wie das Durchtrennen eines Hauses in zwei Hälften in Splitting (1974), sprengte er die Grenzen zwischen Architektur, Skulptur und Malerei und eröffnete neue Ausdrucksformen in der Kunst. Gordon Matta-Clarks berühmte „Cuts“, also seine künstlerischen Eingriffe in bestehende Gebäude, stehen in einem interessanten Spannungsverhältnis zur adaptiven Architektur. Während adaptive Architektur darauf abzielt, bestehende Bauten für neue Zwecke zu erhalten und umzunutzen, griff Matta-Clark radikal in die Bausubstanz ein, indem er Wände, Böden und ganze Gebäude auftrennte (Aesthetica, 2016).

Seine Arbeiten wie Splitting (1974) oder Conical Intersect (1975) hinterfragten nicht nur die physische Struktur von Gebäuden, sondern auch gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedingungen des Städtebaus. Diese Zerstörung als künstlerische Praxis machte auf verfallene oder zum Abriss bestimmte Gebäude aufmerksam und lenkte den Blick auf die Möglichkeit alternativer Nutzungskon-

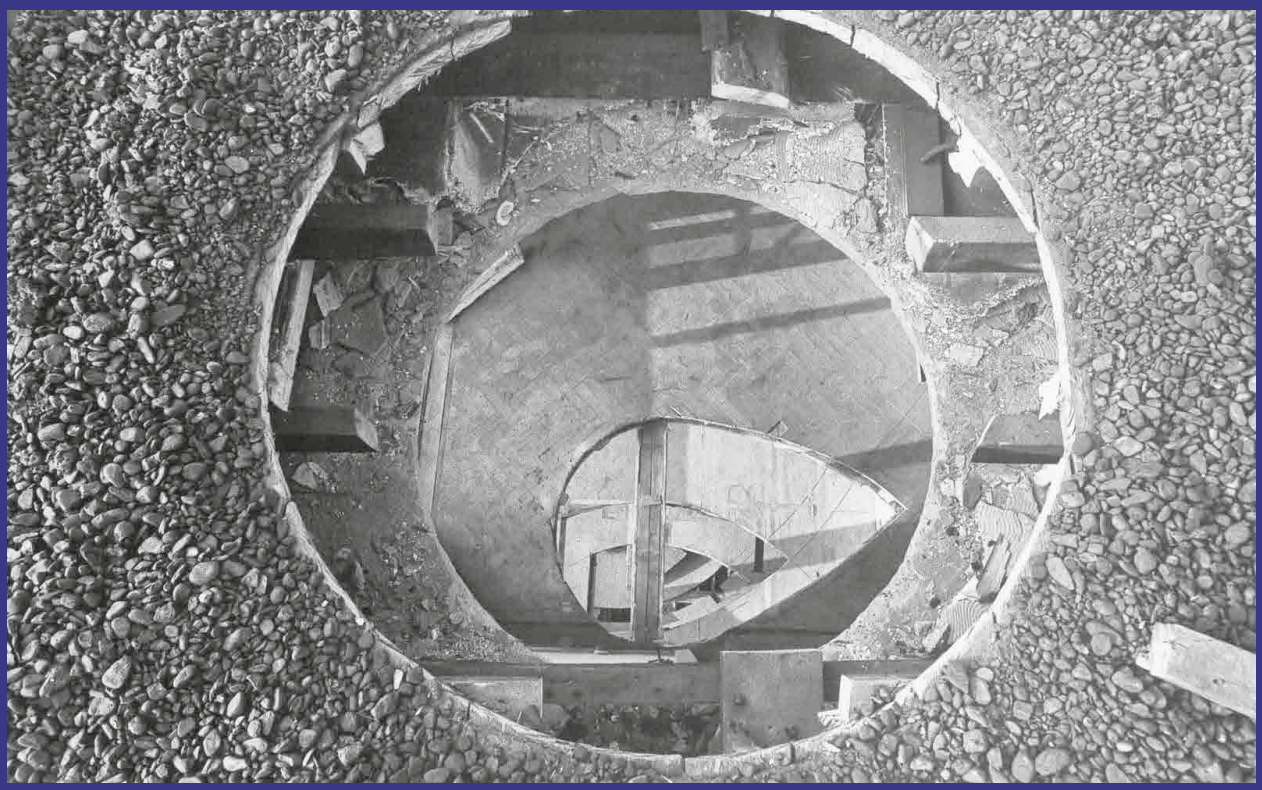


Abb. 20:
Organische „Cuts“der Anarchitects

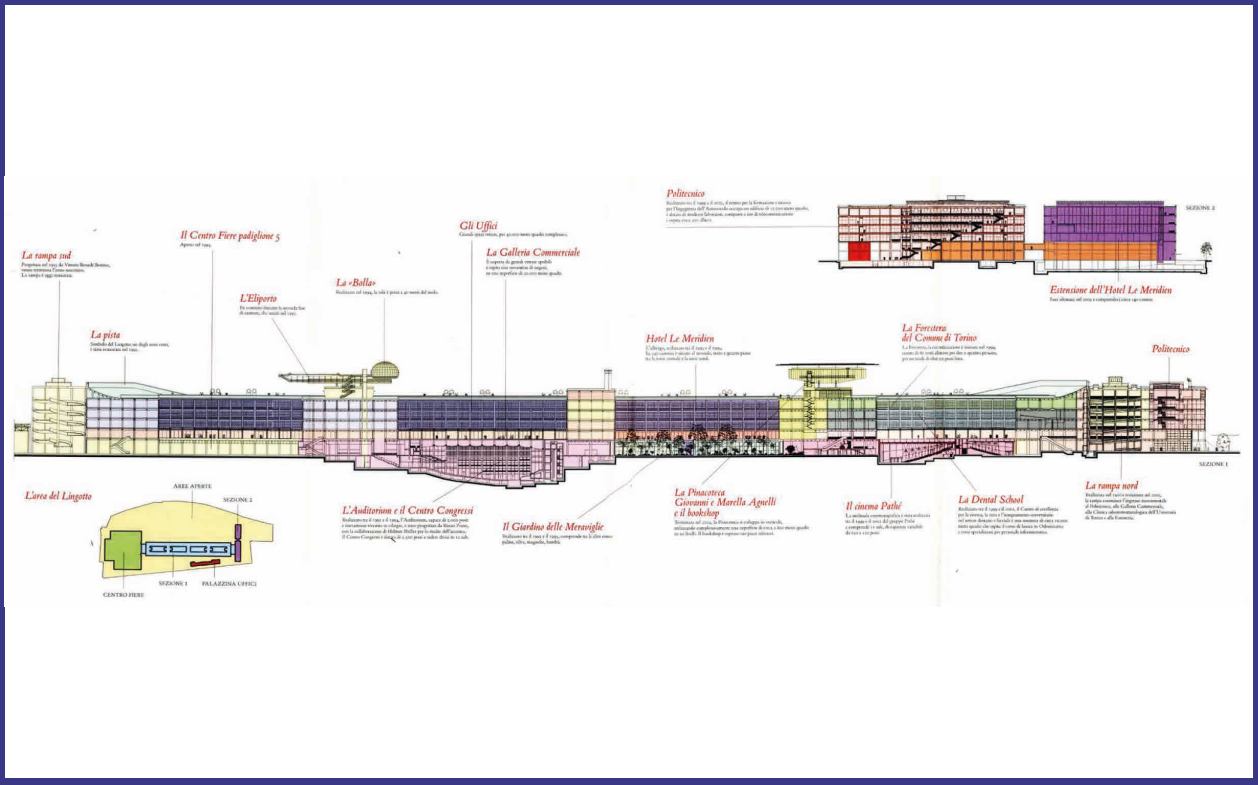
zepte. In gewisser Weise war Matta-Clarks Ansatz eine extreme Form der adaptiven Architektur – nicht durch Erhaltung, sondern durch Dekonstruktion und Umdeutung bestehender Bausubstanz (Zwirner, 2019).

Seine „Cuts“ können somit als radikale Kritik an der traditionellen Architektur verstanden werden, indem sie bestehende Räume neu definierten und die Beziehung zwischen Gebäuden, Nutzern und der Stadtlandschaft hinterfragten. Sie legten verborgene Strukturen offen und eröffneten neue Perspektiven auf den urbanen Raum – ein Prinzip, das auch in der adaptiven Architektur eine Rolle spielt, wenn es darum geht, Gebäude kreativ umzunutzen und an veränderte Anforderungen anzupassen (Zwirner, 2019).

3.2.1 Lingotto, Giacomo Matte-Trucco

Während für die vorgestellte Ford Produktion die Rohstoffe von oben kamen, die industrielle Produktion der Schwerkraft folgte und so ein Ford T-Modell o, Erdgeschoss zum Testen herauskam, produzierte FIAT seine ersten Autos im „Lingotto“ (1916-1926) von Giacomo Matte-Trucco in Turin auf dem umgekehrten Weg: Sie entstanden am Boden und erreichten das Dach des Gebäudes, um auf der Teststrecke geprüft zu werden. „Die italienische Automobilfabrik Fiat hat alle diese Schwierigkeiten auf eine bisher ungewohnte Weise überwunden. Die Fahrzeuge, die die Montage verlassen, werden durch Lastenaufzüge auf die Dachterrasse des großen Gebäudes befördert, die in ungefähr 30 Meter Höhe über Boden zu einer ausgezeichneten Rundbahn von 24 Meter Breite und mehr als ein Kilometer Länge ausgebaut ist.“, ist in der Schweizer Bauzeitschrift aus dem Jahre 1924 zu entnehmen (s. n., 1924). Was waren die Schwierigkeiten der Zeit?

Die steigende Produktion von Automobilen stellte Fiat vor große Herausforderungen: Das Testen der Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen wurde zunehmend unpraktisch, da es Zeit kostete und logistisch aufwendig war, geeig-



106 Abb. 21: Umnutzungs-Strategie des Lingotto

nete Strecken zu finden. Zudem war der Transport der Fahrzeuge zum Testgelände ineffizient, und Witterungseinflüsse konnten die Prüfungen erschweren. Auch die sichere Versorgung mit Treibstoff und Schmiermitteln stellte ein Problem dar. Fiat löste all diese Schwierigkeiten auf innovative Weise – mit einer hochmodernen Teststrecke auf dem Dach des Lingotto-Gebäudes. Dort konnten die frisch montierten Fahrzeuge sofort auf die Rundbahn gelangen und unabhängig von Wetter und äußeren Bedingungen auf Herz und Nieren geprüft werden (Von Ascheraden, 2019).

Die legendäre „Lingotto"-Fabrik in Turin war einst eine der innovativsten Produktionsstätten Europas. Nach dem Vorbild der Ford-Werke in Detroit konzipierte Giovanni Agnelli eine Anlage, die eine komplette Autoproduktionsstraße in einem einzigen Gebäude mit fünf Stockwerken integrierte. Der Bauprozess begann 1916 nach den Plänen des Architekten Giacomo Matté-Trucco. Die Tragstruktur bestand aus einer auf einem Stützenraster von 6 x 6 m basierenden Betonkonstruktion mit Mauerwerksausfa-

chungen und wurde von Giovanni Antonio Porcheddu errichtet, einem Pionier dieser Bautechnik in Italien. Der vertikale Produktionsfluss erreichte seinen Höhepunkt auf dem Dach, wo eine mehr als einen Kilometer lange Teststrecke mit Steilkurven zur Qualitätskontrolle der Fahrzeuge diente (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Konstruktiv hat sich das Lingotto besonders als besonders zukunftsgerichtet in seiner Zeit und auch in der heutigen herausgestellt. Das Lingotto-Gebäude in Turin besaß eine für seine Zeit bahnbrechende Tragstruktur, die sich deutlich von den damals üblichen Industriegebäuden unterschied. Während viele Fabriken der 1920er-Jahre noch als niedrige Hallen mit massiven Backsteinwänden errichtet wurden, setzte Fiat auf eine Stahlbeton-Skelettbauweise. Diese ermöglichte große, offene Hallenflächen ohne tragende Innenwände, wodurch Maschinen flexibler platziert und später ausgetauscht werden konnten. Die Struktur des Gebäudes basierte auf einem regelmäßigen Stützenraster, das eine effiziente Umgestaltung von Maschinen und Produktionslinien erlaubte – ein Konzept, das später zum Standard für moderne Fabriken wurde, damals jedoch noch eine Seltenheit war (RPBW, 2025).

Besonders innovativ war die Deckenstruktur des Lingotto, die speziell für die hohen Lasten der Maschinen und Fahrzeuge ausgelegt war. Die Konstruktion beruhte auf Stahlbeton mit sogenannten Pilzstützen, deren verbreiterte Kopfbereiche die Lasten gleichmäßig verteilten und größere Spannweiten ohne zusätzliche Unterzüge ermöglichten. Dies erhöhte nicht nur die Stabilität, sondern auch die Flexibilität der Innenräume. Zudem wurden die Decken durch zusätzliche Rippen verstärkt, die gezielt dort platziert wurden, wo besonders hohe Lasten zu erwarten waren, etwa an den Standorten schwerer Maschinen. Entlang der Hauptachsen integrierte man massive Stahlbetonträger, die sowohl statische als auch dynamische Lasten sicher auf die Stützen ableiteten (RPBW, 2025).

Eine weitere Besonderheit des Lingotto war die Dachteststrecke – eine architektonische und ingenieurtechnische

Meisterleistung. Die Decke musste nicht nur das Gewicht der Fahrzeuge tragen, sondern auch die dynamischen Belastungen durch Beschleunigung und Bremsvorgänge auf der Strecke aufnehmen. Um Schwingungen und Materialermüdung zu minimieren, wurde die Konstruktion elastisch gestaltet, sodass sich Lasten gleichmäßig auf das gesamte Bauwerk verteilten. Diese Mehrfachnutzung von Flächen machte das Lingotto zu einem Vorreiter in Sachen Flächeneffizienz und produktiver Architektur (RPBW, 2025).

Das Lingotto (510 m x 72 m mit vier Innenhöfen) war einst die wichtigste Autofabrik Italiens, hat 100 Jahre Geschichte überdauert und ist heute eines der pulsierenden Zentren Turins. Es war nicht die Rennbahn auf dem Dach, sondern das vielseitige und flexible Raster, welches das Gebäude tauglich macht für die Ewigkeit (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Nach Jahrzehnten des Betriebs wurde die Produktion ab 1939 schrittweise in den neuen Mirafiori-Komplex verlagert, bis 1982 schließlich die letzten Fahrzeuge das Werk verließen. Statt eines Abrisses entschied man sich für eine Umnutzung, wobei verschiedene Architekten innovative Konzepte einreichten. Letztlich erhielt Renzo Piano den Auftrag zur Transformation. Sein Ansatz basierte auf der Erhaltung der bestehenden Struktur, der Schaffung neuer vertikaler Verbindungen und der behutsamen Integration neuer Elemente. Das Gebäude wurde von Süden nach Norden schrittweise umgestaltet, wobei die industrielle Identität bewahrt wurde. Innenhöfe blieben bestehen, um Licht und Raumgefühl zu erhalten, während moderne Nutzungen integriert wurden (Von Ascheraden, 2019).

Heute beherbergt der Lingotto-Komplex eine Einkaufsstraße, ein Kino, ein Kongresszentrum, Hotels, ein Museum, eine Universität und Geschäftszentren. Besonders auffällig sind der von Piano geschaffene Konzertsaal mit hölzerner Innenausstattung sowie eine markante Glaskugel mit Panoramablick über Turin. Die Dachrennbahn, einst für Autotests genutzt, dient nun als Laufstrecke für

Jogger. Dieses Beispiel einer erfolgreichen Umnutzung zeigt die Prinzipien der Zirkularität und nachhaltigen Stadtentwicklung, indem ein einst industrielles Bauwerk in ein lebendiges, multifunktionales Zentrum verwandelt wurde, das sich nahtlos in die urbane Umgebung einfügt (Prusicki, 2023).

Insgesamt setzte das Gebäude neue Maßstäbe für den Industriebau. Seine Kombination aus innovativer Tragstruktur, flexibler Nutzung und zirkulärer Architektur ermöglichte nicht nur eine jahrzehntelange Nutzung für verschiedene Fahrzeugmodelle, sondern auch eine spätere Umnutzung des Gebäudes in ein modernes Mehrzweckzentrum. Damit bewies das Lingotto bereits in den 1920er-Jahren, wie nachhaltige Bauweise und industrielle Effizienz miteinander verbunden werden können.



Abb. 22:
Rennstrecke auf dem ehemaligen FIAT Gebäude

3.1.3 Gestalterische Prinzipien und Herausforderungen

Zusätzlich zu diesen Ansätzen lassen sich weitere gestalterische Prinzipien der adaptiven Architektur identifizieren, die über die Dichotomie von Duplikation und Subversion hinausgehen. Die Strategie der Kontrastierung nutzt gezielt den Bruch zwischen Alt und Neu als gestalterisches Mittel, um die historische Entwicklung eines Gebäudes sichtbar zu machen. Ein weiteres Prinzip ist die Integration, bei der moderne Ergänzungen so subtil in die bestehende Struktur eingefügt werden, dass sie eine harmonische Einheit bilden (Wong, Adaptive Reuse in Architecture: A typological index, 2023).

Diese Prinzipien bringen spezifische Herausforderungen mit sich. Während die Kontrastierung das Risiko birgt, dass neue Elemente zu dominant wirken und den Bestand überlagern, kann eine zu zurückhaltende Integration dazu führen, dass die Ergänzungen unsichtbar bleiben und das architektonische Potenzial ungenutzt bleibt. Entscheidend ist daher eine ausgewogene Gestaltung, die sowohl den Charakter des Bestands respektiert als auch zeitgemäße Anforderungen erfüllt (Wong, Adaptive REUSE: Extending the Lives of Buildings, 2017).

Neben den gestalterischen und funktionalen Aspekten ist insbesondere der nachhaltige Vorteil der adaptiven Architektur hervorzuheben. Die Weiternutzung bestehender Gebäude spart erhebliche Mengen an Ressourcen, reduziert den Energieaufwand für Abriss und Neubau und trägt wesentlich zur Senkung von CO_2-Emissionen bei. Zudem minimiert sie Bauschutt und verhindert die Bodenversiegelung, die mit Neubauten oft einhergeht. Angesichts der Klimakrise wird immer deutlicher, dass nachhaltige Architektur nicht nur in innovativen Neubauten liegt, sondern vor allem in der intelligenten Transformation des Bestands (Wong, Adaptive REUSE: Extending the Lives of Buildings, 2017).

Die Beispiele des Lignottos oder künstlerische Eingriffe

wie die „Cuts“ von Gordon Matta-Clark zeigen, dass adaptive Architektur nicht nur eine technische oder wirtschaftliche Notwendigkeit ist, sondern auch eine kulturelle Reflexion über die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft von Gebäuden darstellt. Gleichzeitig macht sie deutlich, dass nachhaltiges Bauen nicht zwangsläufig den Verzicht auf architektonische Qualität bedeutet, sondern vielmehr neue gestalterische Möglichkeiten eröffnet, um historische Identität mit zeitgemäßer Nutzung zu verbinden (Zwirner, 2019) (Aesthetica, 2016) (Wong, Adaptive REUSE: Extending the Lives of Buildings, 2017)

3.2 Historische Entwicklung des zirkulären Bauens

Die Idee des zirkulären Bauens ist kein neues Konzept, sondern ein Prinzip, das sich über Jahrhunderte hinweg in unterschiedlichen architektonischen Strömungen und Bauweisen widerspiegelt. Bereits während der industriellen Revolution entstanden Bauformen, die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit betonten – Qualitäten, die heute mit Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung in Verbindung gebracht werden.

Ein frühes Beispiel liefern die um 1900 entstandenen Industrieanlagen in Detroit. Architekten wie Albert Kahn entwickelten für Henry Ford modulare Fabriken mit offenen Strukturen, die sich flexibel an veränderte Produktionsprozesse anpassen ließen (Wikipedia, 2024). Solche adaptiven Ansätze zeigen, dass Wiederverwendbarkeit lange vor dem heutigen Begriff der Zirkularität eine Rolle spielte.

Der Gedanke der Demontierbarkeit reicht noch weiter zurück. Gottfried Semper formulierte bereits 1851 mit seiner Bekleidungstheorie – inspiriert durch die karibische Hütte – ein Verständnis von Architektur als Zusammenspiel funktionaler und reversibler Schichten (Semper, 1851/1989). Damit legte er eine theoretische Grundlage für trennbare und rekonfigurierbare Bauweisen.

Im 19. und 20. Jahrhundert führten vor allem temporäre Bauten das Prinzip der Demontage weiter. Der Crystal Palace (1851), voll-



Abb. 23: Blick auf das Experimentalhaus R128 von Werner Sobek

ständig modular und nach der Ausstellung wiederaufgebaut, gilt als ikonisches Beispiel (Higgott, 2002). Auch Projekte wie der IBM Travelling Pavilion von Renzo Piano oder der EXPO-Pavillon von Peter Zumthor zeigen, wie zirkuläres Denken bereits in temporärer Architektur umgesetzt wurde.

Heute belegen Projekte wie das Circular Building (London, 2016) oder das Circle House (Malmö, 2020), dass auch dauerhafte Gebäude rückbaubar und wiederverwendbar geplant werden können. Sie setzen auf modulare Systeme, dokumentieren den Materialkreislauf digital und ermöglichen so eine hohe Zirkularität (Arup, 2016; GXN, 2020).

Digitale Werkzeuge wie Building Information Modeling (BIM) und digitale Zwillinge erfassen den gesamten Lebenszyklus von Bauteilen und unterstützen die gezielte Wiederverwendung (Ellen MacArthur Foundation, 2021). Dadurch wird Zirkularität nicht nur planbar, sondern auch messbar.

Ein wesentliches Hindernis bleibt jedoch in konventionellen Bauweisen: verklebte Materialien, eingegossene Installationen

oder nicht trennbare Schichten erschweren die Demontage. Neue Ansätze setzen deshalb auf mechanische und steckbare Verbindungen, die Rückbaufähigkeit und Wiederverwendung ermöglichen (Building Circularity Index, 2022). Ein Gebäude gilt dann als wirklich zirkulär, wenn es in umgekehrter Reihenfolge zurückgebaut werden kann – ein Kriterium, das zunehmend als Maßstab für zukunftsfähiges Bauen gilt (Kibert, 2016).

3.2.2 Experimentalhaus R128, Werner Sobek

Das Haus des Ingenieur-Architekten Werner Sobek, das er vor mehr als 20 Jahren für sich und seine Familie entworfen hat, war ein echtes Pilotprojekt für reversibel konstruierte Architektur und soll hier als Ausgangspunkt für Überlegungen zu diesem Thema vorgestellt werden. Tatsächlich ist es trotz der geplanten Möglichkeit nie versetzt worden und hat das Versprechen seiner Demontierbarkeit noch nicht eingelöst. Dennoch sollten die Prinzipien, nach denen es gebaut ist, jeden Entwurf leiten, der sich der zirkulären Architektur annähern will. Das von Werner Sobek entworfene Experimentalhaus R128, das im Jahr 2000 fertiggestellt wurde, steht auf einem steilen Grundstück am Rande des Stuttgarter Talkessels. Es wurde als vollständig rezyklierbares, emissionsfreies Nullheizenergie-Gebäude konzipiert. Die vollständig verglaste Fassade besteht aus hochwertiger Dreifachverglasung mit einem k-Wert von 0,4. Dank der modularen Bauweise und der Verwendung von Steck- und Schraubverbindungen kann das Gebäude leicht montiert und demontiert werden, was eine vollständige Wiederverwertbarkeit ermöglicht (Werner Sobek AG, o. J.-a; Archello, 2020).

Die Geschossdecken des R128 bestehen aus vorgefertigten Holzplatten mit einer Dicke von 6 cm, die mit einem Kunststoffbelag versehen sind. Diese Platten wurden zwischen die Deckenträger eingelegt, ohne verschraubt zu werden. Unterhalb der Decken befinden sich Aluminium-Deckenelemente, die über Clipverbindungen befestigt sind. Diese Elemente integrieren Beleuchtung, akustische Absorberflächen und wasserführende Kupferrohrschlangen, die als Heiz- und Kühlsystem dienen. Alle Versorgungsleitungen

verlaufen in gefalzten Aluminiumkanälen entlang der Innenseiten der Fassade, wodurch Unterputzsysteme überflüssig werden und eine einfache Anpassung sowie maximale Rezyklierbarkeit gewährleistet sind.

Die Tragstruktur besteht aus einem verschraubten Stahlskelett mit zwölf Stützen, die in einem Raster von 3,85 m x 2,90 m angeordnet sind und mit Riegeln in zwei Richtungen verbunden werden. Die Aussteifung erfolgt an drei Seiten durch Zugstäbe. Dank der präzisen Vorfertigung konnte der gesamte viergeschossige Stahlbau in nur vier Arbeitstagen montiert werden. Das Gesamtgewicht des Gebäudes (ohne Fundament, aber inklusive Fassade) beträgt 39.800 kg.

Im Innenraum verzichtet das R128 auf trennende Wände, was eine visuelle Kontinuität zwischen Innen- und Außenraum schafft. Die wenigen Möbelstücke sind beweglich und auf das Wesentliche reduziert, um Flexibilität und Funktionalität zu betonen.

Das R128 dient als Pilotprojekt für zukunftsweisende Architektur, die Nachhaltigkeit, Flexibilität und Transparenz miteinander verbindet. Es demonstriert, wie durchdachte Konstruktion und Materialwahl zu einem klaren architektonischen Ausdruck führen können, der den Prinzipien der zirkulären Architektur entspricht (Werner Sobek AG, o. J.-a; Archello, 2020).

3.2.3 Gestalterische Prinzipien und Herausforderungen

Das zirkuläre Bauen ist eine zentrale Antwort auf die Herausforderungen der modernen Architektur und verbindet ökologische, ökonomische sowie gestalterische Prinzipien. Dabei ist es keineswegs ein neues Konzept, sondern vielmehr eine Wiederentdeckung und Weiterentwicklung von Bauweisen, die über Jahrhunderte hinweg in verschiedenen architektonischen Strömungen verankert waren. Die historische Entwicklung zeigt, dass Aspekte wie Flexibilität, Demontierbarkeit und Wieder-

verwendbarkeit nicht nur aktuelle Erfordernisse der Nachhaltigkeit sind, sondern sich bereits aus funktionalen und wirtschaftlichen Notwendigkeiten heraus entwickelt haben.

Schon im 19. Jahrhundert beobachtete Gottfried Semper, dass traditionelle Bauweisen, wie die karibische Hütte auf der Weltausstellung 1851, auf reversiblen Konstruktionsprinzipien beruhten. Seine Bekleidungstheorie legte den Grundstein für das Verständnis von Architektur als System funktionaler Schichten, die im Idealfall getrennt und wiederverwendet werden können. Mit der industriellen Revolution verstärkte sich dieser Gedanke weiter. Die modulare und offene Bauweise der Ford-Fabriken von Albert Kahn in Detroit oder das Lingotto-Gebäude in Turin zeigten, wie Gebäude so konzipiert werden konnten, dass sie sich verändernden Produktionsprozessen anpassen ließen. Diese Prinzipien der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit sind auch heute essenziell für eine nachhaltige Bauweise, die Gebäude nicht als statische, sondern als dynamische Systeme betrachtet.

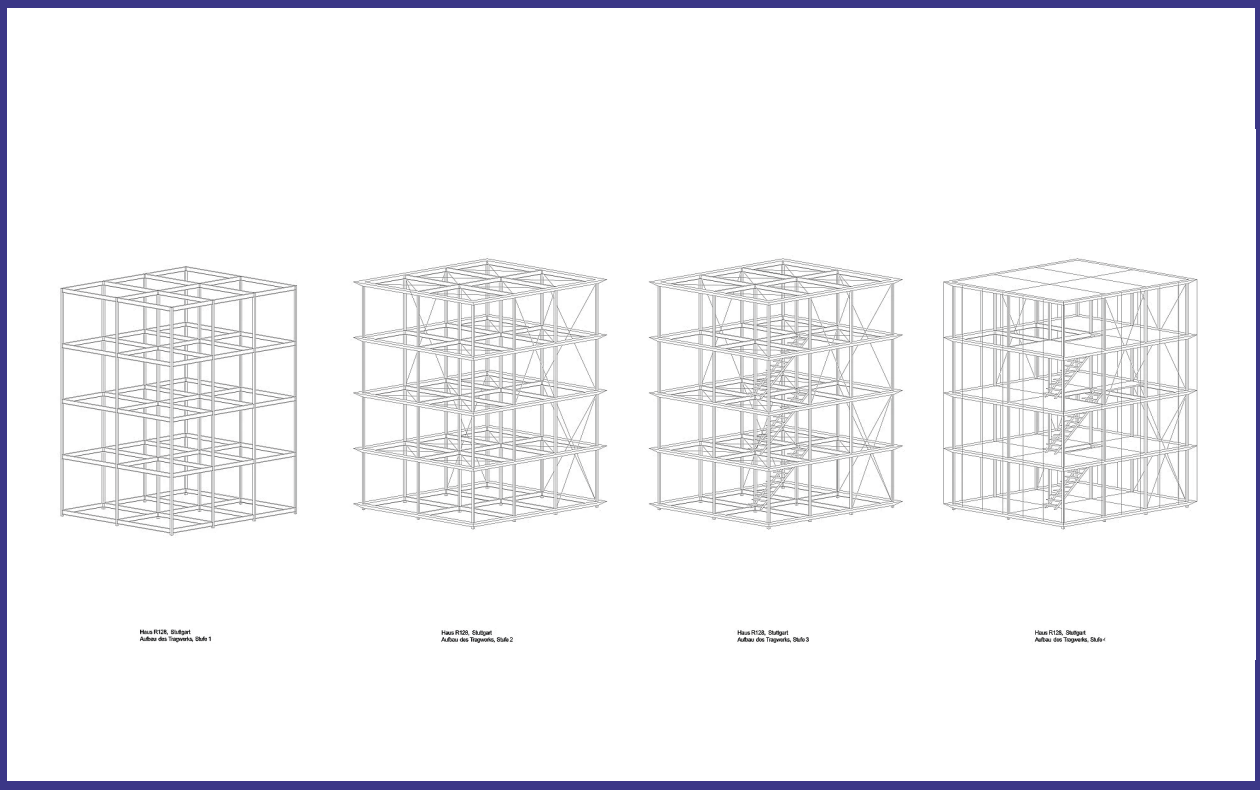


Abb. 24:
Tragstruktur des Experimentalhaus R128 von Werner Sobek

Die Geschichte der temporären Architektur, etwa mit Pavillons wie dem Crystal Palace (1851) oder dem IBM Travelling Pavilion von Renzo Piano, hat ebenfalls gezeigt, dass Gebäude bewusst für einen begrenzten Zeitraum errichtet und rückgebaut werden können. Diese Konzepte wurden in der modernen Architektur weiterentwickelt und durch digitale Technologien wie BIM-Design optimiert, um den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks von der Errichtung bis zur Demontage effizient zu steuern.

Trotz dieser historischen Vorbilder bleiben Herausforderungen bestehen. Ein zentrales Problem des zirkulären Bauens liegt in der Trennbarkeit der Materialien und Bauteile. Historische Bauwerke setzten vielfach auf einfache Fügungen wie Holzverbindungen oder mechanische Verankerungen, während in der modernen Bauindustrie Verklebungen, eingegossene Installationen und chemische Bindungen dominieren, die eine Wiederverwendbarkeit erschweren. Projekte wie das Experimentalhaus R128 von Werner Sobek zeigen, dass durch den bewussten Einsatz von Schraub- und Steckverbindungen eine vollständige Demontierbarkeit erreicht werden kann. Damit wird ein wichtiger Schritt hin zu einer Architektur vollzogen, die nicht nur nachhaltig, sondern auch reversibel ist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die gestalterischen Prinzipien des zirkulären Bauens – Modularität, Demontierbarkeit, Materialtrennung und flexible Nutzung – nicht nur aus ökologischen Überlegungen heraus entstanden sind, sondern tief in der Baugeschichte verankert sind. Die historischen Beispiele verdeutlichen, dass nachhaltige Architektur bereits in der Vergangenheit durch innovative Tragstrukturen und intelligente Bauweisen realisiert wurde. Die Herausforderung der Gegenwart besteht darin, dieses Wissen mit modernen Technologien zu verknüpfen und in eine breite baupraktische Umsetzung zu überführen. Nur wenn das zirkuläre Bauen über Pilotprojekte hinaus in die alltägliche Baupraxis integriert wird, kann es eine langfristige Antwort auf die globalen He-

rausforderungen der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes bieten.

3.3 Zeitgenössische Projekte adaptiven und zirkulären Bauens

3.3.1 Bahnhof San Cristoforo, Studio Albori, 2006

Bereits seit den 1990er Jahren setzen sich Emanuele Almagioni, Giacomo Borella und Francesca Riva vom Studio Albori in Mailand mit dem Thema des Wegwerfens und Abbrechens auseinander. Statt Abriss und Neubau verfolgen sie einen nachhaltigen Ansatz, bei dem Materialien und bestehende Strukturen möglichst erhalten und wiederverwendet werden.

Ein zentrales Beispiel dieses Konzepts ist die Wiederbelebung des verlassenen Bahnhofs San Cristoforo in Mailand, entworfen von Aldo Rossi und Gianni Braghieri. Anstatt das umgangssprachlich als „Ökomonster“ bekannte



Abb. 25:
Blick auf den verlassenen Bahnhof San Cristoforo, 2006

Gebäude abzureißen, entwickelten die Architekten eine Lösung, die das bestehende Skelett mit Wohnmodulen in Leichtbauweise ergänzt. Das Projekt wurde auf der Biennale in Venedig 2008 in einem 1:1-Modell präsentiert (Albori, 2008).

Transformation of Space & Nachhaltige Bauweise

Das unvollendete Baugerüst sollte nicht gesprengt, sondern als Grundstruktur für ein neues Wohnensemble genutzt werden. Dabei werden vorhandene Materialien weiterverwendet, wodurch sowohl Abfälle minimiert als auch der Ressourcenverbrauch gesenkt werden. Die Bauweise setzt auf Recyclingmaterialien, darunter Reststoffe aus der Bauindustrie sowie alternative, branchenfremde Materialien. Zudem sollen möglichst viele Bauteile direkt in der Nähe des Bauplatzes produziert und verarbeitet werden, um Transportwege zu reduzieren und den ökologischen Fußabdruck zu verringern (Albori, 2008).

Prozesshaftes Bauen & Flexible Nutzung

Das Projekt verfolgt einen prozessorientierten Ansatz, bei dem sich die Gestaltung und Nutzung im Laufe der Zeit weiterentwickeln können. Die Baustelle selbst dient als Experimentierfeld, in das Universitäten, Bauschulen, Unternehmensverbände, Ausbildungszentren und Bewohnervereinigungen eingebunden werden. Dabei werden die bestehenden Strukturen nicht nur wiederverwendet, sondern flexibel an neue Anforderungen angepasst, ohne dass umfassende Umbauten notwendig sind (Albori, 2008).

Wirtschaftliche Nachhaltigkeit & soziale Durchmischung

Die Finanzierung des Projekts basiert auf einem Modell, das wirtschaftliche Tragfähigkeit mit sozialer Durchmischung verbindet. Während einzelne Wohneinheiten verkauft werden, um die Finanzierung zu sichern, wird der Großteil der Wohnungen zu unterschiedlichen Mietpreisen vergeben. Dadurch soll eine lebendige und heterogene Nachbarschaft entstehen, die soziale Segregation vermeidet. Neben Wohnraum umfasst das Konzept auch Gemeinschaftseinrichtungen wie eine Bar-Tratto-



Abb. 26: Entwurf zur Umnutzung des Bahnhof San Cristoforo, 2006

ria, eine Kita, ein kleines Theater sowie Werkstätten (Divisare, 2011).

Komfortstandards und Suffizienz

Trotz des Fokus auf Nachhaltigkeit bleibt das Projekt hohen Komfortstandards verpflichtet. Die Gestaltung der Wohnzellen verbindet die geometrische Klarheit der ursprünglichen Struktur mit einer vielfältigen Form- und Farbensprache. Dabei wird Suffizienz als Prinzip verfolgt: Ressourcen werden effizient genutzt, ohne dabei die Wohnqualität zu beeinträchtigen (Albori, 2008).

Demontierbare Konstruktionen & Entflechtung von Gebäudeschichten

Ein zentrales Konzept des Projekts ist die Trennung der verschiedenen Gebäudeschichten. Dadurch können einzelne Komponenten einfacher ausgetauscht, repariert oder wiederverwendet werden. Zudem wird auf demontierbare Konstruktionen gesetzt, um zukünftige Anpassungen oder Rückbauten zu erleichtern (Divisare, 2011).

Maximale Nutzung erneuerbarer Energien
Das Gebäude nutzt eine Kombination aus Solarthermie, Photovoltaik und Geothermie. Überschüssige Wärme aus den Sommermonaten wird in einem isolierten Wassertank gespeichert und im Winter zur Beheizung genutzt. Diese intersaisonale Wärmespeicherung ermöglicht eine energieeffiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen (Divisare, 2011).

Wiederverwendung von Baumaterialien
Ein weiteres innovatives Element ist die Wiederverwertung von Baumaterialien und Abfällen. Experimentelle Methoden, wie die Herstellung von Wandisolationspaneelen aus recycelten Tetrapak-Behältern, demonstrieren das Potenzial nachhaltiger Baumaterialien. Diese modularen Paneele zeichnen sich durch ihre Leichtigkeit, Robustheit und hervorragende Dämmeigenschaften aus (Albori, 2008).

Fazit

Das Projekt „Ecomostro Addomesticato“ von Studio Albori zeigt eindrucksvoll, wie nachhaltige Architektur alternative Wege zum konventionellen Bauen aufzeigt. Durch die Wiederverwendung einer bestehenden Struktur, die Nutzung recycelter Materialien und den Einsatz erneuerbarer Energien wird ein geschlossener Materialkreislauf geschaffen. Gleichzeitig bietet der partizipative Ansatz eine zukunftsweisende Möglichkeit, Architektur als offenen, dynamischen Prozess zu verstehen, der sich kontinuierlich an veränderte Bedürfnisse anpassen kann. Damit stellt das Projekt eine innovative und nachhaltige Lösung für den Umgang mit unvollendeten Bauwerken dar (Divisare, 2011).

3.3.2 Ecole Nationale Superieure d‘Architecture, Lacaton & Vassal, Nantes, 2009

Das Pariser Studio Lacaton & Vassal entwarf die Architekturschule in Nantes als flexible, zukunftsorientierte Infrastruktur, die sich den Bedürfnissen der Nutzenden



Abb. 27:
Blick auf die
Architekturschule
in Nantes

anpasst. Das Gebäude folgt konsequent dem Schichtenmodell und ermöglicht eine dynamische Nutzung durch eine klare Trennung von Primärstruktur und Innenausbau (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Flexible Nutzung

Die Hauptstruktur aus 80 x 80 cm starken Betonstützen und Hohlkörperdecken erlaubt den Einbau von Zwischengeschossen aus Stahl, wodurch die Nutzfläche verdreifacht werden kann. Die dreistöckigen Betondecken tragen bis zu 1 t/m² und ermöglichen den Bau von Eins-zu-Eins-Modellen durch die Studierenden, was eine praxisnahe, experimentelle Lehre begünstigt. Die überdimensionierte Primärstruktur lässt dabei Raum für zukünftige Anpassungen und Erweiterungen, sodass das Gebäude mit den sich wandelnden Bedürfnissen seiner Nutzer*innen mitwachsen kann. Durch die großzügige Raumhöhe entstehen flexible Zonen, die temporär umgestaltet werden können — sei es für Ausstellungen, Workshops oder andere temporäre Nutzungen (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

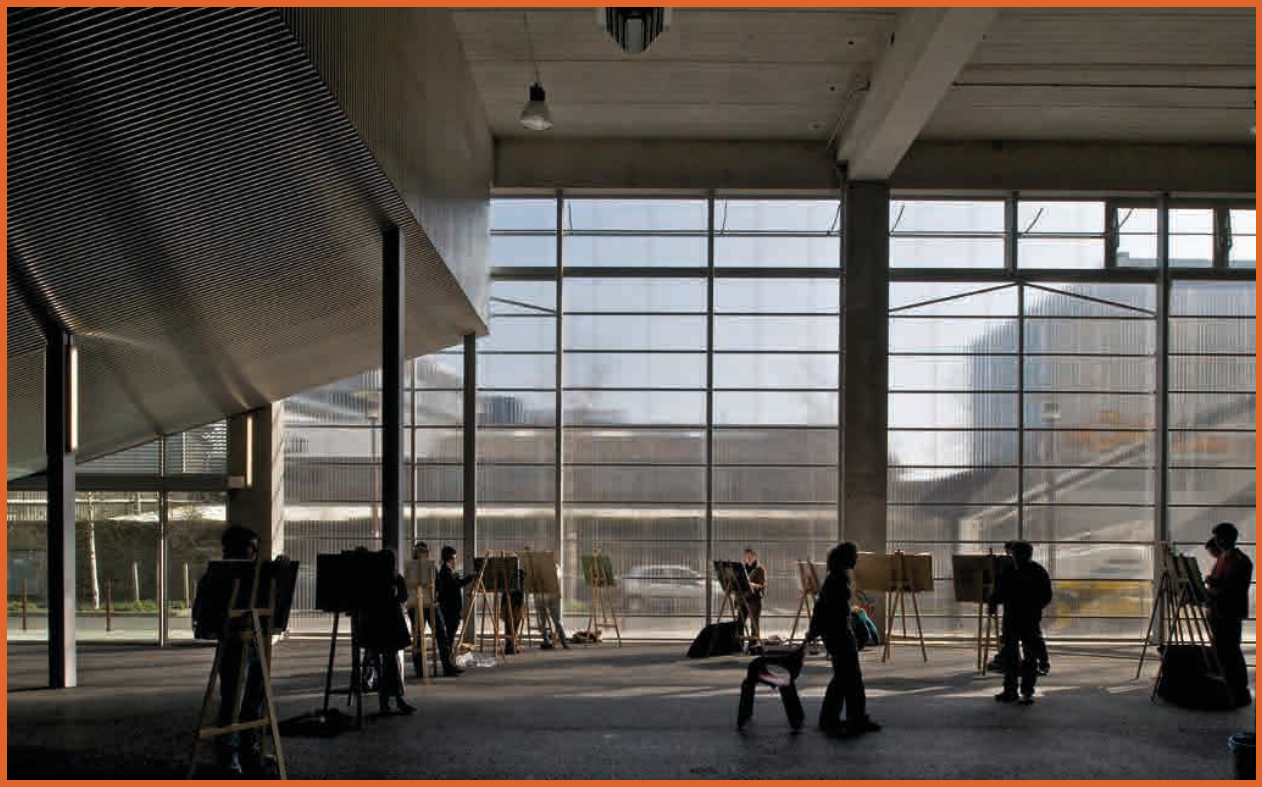


Abb. 28:
Großzügige Raumgeometrien schaffen verschiedene Möglichkeiten und lassen jegliche Umnutzung zu

Demontierbare Konstruktionen

Die vorgehängte Fassade besteht aus verzinktem Stahl, Glas und Polycarbonat, ist leicht und vollständig transparent, was nicht nur die optische Leichtigkeit des Gebäudes unterstreicht, sondern auch den Materialeinsatz reduziert. Die Fassadenelemente können bei Bedarf ausgetauscht oder optimiert werden, ohne die Hauptstruktur zu beeinträchtigen. Innere Trennwände aus Aluminium und Glas sind modular, demontierbar und ermöglichen flexible Raumkonfigurationen — so können sich Nutzungsbereiche je nach Bedarf neu organisieren. Technische Installationen sind sichtbar, leicht zugänglich und jederzeit erweiterbar, was eine kontinuierliche Anpassung an technologische Entwicklungen erlaubt und teure, ressourcenintensive Eingriffe vermeidet (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Entflechtung der verschiedenen Schichten eines Gebäudes

Die Architektur trennt bewusst Konstruktion, Fassade

und Innenausbau, sodass Anpassungen ohne Eingriffe in die tragende Struktur möglich sind. Die Sekundärstruktur ist theoretisch austauschbar und als eigenständige Schicht gedacht. Diese Trennung der Systeme erlaubt es, einzelne Bauteile gezielt zu erneuern oder aufzuwerten, was die Lebensdauer des Gebäudes als Ganzes verlängert. Dadurch wird das Prinzip der Kreislaufwirtschaft direkt in den Bauprozess integriert: Materialien und Bauteile können nach ihrer Nutzung wiederverwendet oder recycelt werden (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Prozesshaftes Bauen

Die Nutzung und Definition der Räume erfolgt iterativ durch die Studierenden und Lehrenden, sodass das Gebäude bewusst unvollständig bleibt und sich als sich ständig entwickelnde Plattform versteht. Die Offenheit der Architektur lädt zur aktiven Mitgestaltung ein: Räume werden nicht nur genutzt, sondern auch weiterentwickelt. Dieser prozesshafte Ansatz macht das Gebäude zu einem lebendigen Labor, das neue Ideen und Raumkonzepte hervorbringt. So wird die Architektur selbst zum Lerngegenstand und fördert eine kreative Auseinandersetzung mit dem Raum (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Nachhaltige Bauweise

Durch die Trennung der Schichten und die Demontierbarkeit vieler Bauteile wird die Wiederverwendbarkeit maximiert und Abfall minimiert. Die bewusste Entscheidung für langlebige, robuste Materialien in der Primärstruktur sorgt für eine stabile Grundlage, während leichtere, nachhaltige Materialien in den flexiblen Bauelementen verwendet werden. So entsteht eine Balance zwischen Beständigkeit und Anpassungsfähigkeit. Die Architektur folgt dem Prinzip der Suffizienz: Sie bietet genau so viel Raum und Material, wie nötig ist, und vermeidet unnötigen Ressourcenverbrauch durch überdimensionierte, starre Lösungen (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

Die Architekturschule Nantes verkörpert damit ein radikales Verständnis von Architektur als wandelbare, zukunftsoffene Infrastruktur. Sie zeigt, wie durch ein konsequen-

tes Schichtenmodell, demontierbare Konstruktionen und flexible Nutzungsmöglichkeiten eine nachhaltige, adaptive Architektur entstehen kann. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass eine langfristige, nachhaltige Bauweise nicht durch Verzicht, sondern durch intelligente, anpassungsfähige Konzepte erreicht werden kann (Stricker, Brandi, & Sonderegger, 2021).

3.3.3 Gebäude Anton, diederendirrix architects, Eindhoven (NL), 2014

Das Gebäude Anton in Eindhoven ist ein eindrucksvolles Beispiel für die Transformation eines ehemaligen Industriebaus in modernen Wohnraum, der Historie bewahrt und zugleich Raum für Gemeinschaft und Flexibilität schafft. Im Rahmen der Umgestaltung wurde die industrielle Vergangenheit so weit wie möglich sichtbar gelassen: Originale Betonböden, Wände und Säulen wurden schonend gereinigt und nicht verdeckt, sodass sie den Wohnräumen Charakter und Authentizität verleihen. Neue Materialien wie graugrüne Oberflächen und Holzelemente verstärken den rauen, aber wohnlichen Charme und schaffen eine harmonische Balance zwischen Alt und Neu (Baunetzwissen, 2025).

Transformation des Raums und vertikale Dynamik
Die größte strukturelle Veränderung war der Wechsel von einer horizontalen zu einer vertikalen Raumnutzung. Früher waren die sieben Etagen nur durch einen zentralen Aufzug und Treppen in den Ecken verbunden – Männer und Frauen arbeiteten sogar auf separaten Stockwerken mit getrennten Eingängen. Heute fördern schmale, geschickt platzierte Treppen die Begegnung: Die Etagen sind durch fünf vertikale Lufträume mit ovalen Zwischengeschossen verbunden, die spannende Sichtachsen und fließende Übergänge zwischen den Stockwerken schaffen. Die versetzten Korridore verwandeln Durchgänge in soziale Treffpunkte und machen den Raum selbst zum Kommunikationsort (diederendirrix, 2014).

Flexible und partizipative Nutzung

Die 145 Loftwohnungen (50–80 m²) wurden als offene, unaufgeteilte Einheiten übergeben – lediglich zwei funktionale Möbelstücke sind fest integriert: ein 2,5 Meter hoher Holzwürfel mit Bad und ein Küchenmodul. Beide Elemente sind mobil und können je nach Bedarf an zwei Positionen im Loft angeschlossen werden. Viele Bewohner nutzen den Würfel als Schlafplattform oder Raumtrenner. Durch leichte Trennwände lassen sich Lofts unkompliziert kombinieren oder in Büros umwandeln, sodass sich die Nutzung mit den Lebensbedürfnissen verändert (diederendirrix, 2014).

Nachhaltige Bauweise und ressourcenschonende Transformation

Die Transformation des Gebäudes erfolgte unter Berücksichtigung nachhaltiger Prinzipien: Bestehende Bausubstanz wurde maximal erhalten, um Materialverbrauch und Abfall zu minimieren. Die ursprüngliche Fassadenstruktur und historische Details in den Treppenhäusern blieben bewahrt, während moderne, energieeffiziente Elemente



Abb. 29: Blick auf das Gebäude Anton im Bauprozess



Abb. 30: Blick in die neu eingeschnittenen Treppenkerne zum Austausch von Licht und Lebensqualität

wie doppelt verglaste Aluminium-Schiebetüren integriert wurden. Diese Türen ermöglichen es, die Lofts mit einem Handgriff in eine Art Innenbalkon zu verwandeln – ein cleveres Raumkonzept, das den Verzicht auf private Außenflächen ausgleicht (diederendirrix, 2014).

Gemeinschaft und das Konzept der „kleinen Stadt“

Das Gebäude Anton ist weit mehr als nur ein Wohnhaus – es funktioniert wie eine kleine Stadt. Im Erdgeschoss gibt es Cafés, Geschäfte und Arbeitsräume, die sowohl von Bewohnern als auch von der Nachbarschaft genutzt werden. Dies fördert soziale Interaktion und trägt dazu bei, dass sich eine lebendige, unterstützende Community entwickelt hat. Besonders Selbstständige und Berufseinsteiger profitieren von der Nähe zueinander und helfen sich gegenseitig in beruflichen und praktischen Angelegenheiten (diederendirrix, 2014).

Ein Blick in die Zukunft: Anton als Teil eines wachsenden Stadtviertels

Das denkmalgeschützte Gebäude gehört zur ehemali-

gen Philips-Industrieanlage Strijp-S, die schrittweise in ein lebendiges Stadtquartier umgewandelt wird. Anton zeigt exemplarisch, wie durch sensible, nachhaltige Umnutzung aus einem geschlossenen Industriekomplex ein dynamischer, zukunftsgerichteter Lebensraum entsteht, der Gemeinschaft, Flexibilität und historisches Erbe miteinander verbindet (Baunetzwissen, 2025).

3.3.4 Department store Brixton, Squire Partner, London (GB), 2017

Nach 16 Jahren in King's Cross zog das Architekturbüro Squire & Partners im Sommer 2017 mit seinen 220 Mitarbeitern in ein neues Zuhause in Brixton. Zwei Jahre zuvor hatten sie ein heruntergekommenes, edwardianisches Kaufhaus erworben und es umfassend umgestaltet. Dabei ließen sie sich von der historischen Substanz des Gebäudes inspirieren und entwickelten ein Design, das die vorhandene Architektur bewahrt und gleichzeitig moderne Anforderungen integriert.

Der neue Firmensitz vereint Büro- und Veranstaltungsräume mit Einzelhandelsflächen, die die lokale Gemeinschaft und kreative Unternehmen unterstützen. Im Erdgeschoss befinden sich eine Kaffeerösterei, ein Sushi-Restaurant, ein unabhängiger Plattenladen, eine Postfiliale sowie das Restaurant und die Bar Canova Hall. Das Gebäude wurde nicht nur wieder instand gesetzt, sondern auch als lebendiger Teil des Stadtviertels reaktiviert (Open House Festival, 2017).

Historische Entwicklung des Gebäudes und Transformation of Space

Das Bon Marché-Kaufhaus wurde 1876 von James Smith erbaut, der sein Vermögen durch den überraschenden Doppelsieg seines Rennpferdes Roseberry gewann. Inspiriert von der Pariser Opulenz des Bon Marché schuf Smith eine Einkaufsdestination mit einer innovativen Stahlrahmenkonstruktion – der ersten in Großbritannien.

1906 wurde das Hauptgebäude durch eine Erweiterung

an der Ferndale Road ergänzt, bekannt als Toplin House, das zusätzliche Verkaufsflächen sowie Unterkünfte für das Personal bot. Während des Zweiten Weltkriegs diente das Gebäude als Luftschutzbunker, bevor es 1955 in Büroflächen umgewandelt wurde. Im Laufe der Jahre wurde es von verschiedenen Institutionen genutzt, darunter der British Refugee Council, bevor es 2012 leer stand und schließlich von Squattern bewohnt wurde, die mit ihrer Kunst einen weiteren Abschnitt der Geschichte hinterließen.

Mit dem Kauf von Toplin House und angrenzenden Gebäuden, darunter eine ehemalige Pferde- und Wagenfeuerwache, begann Squire & Partners 2015 mit der umfassenden Sanierung und Umnutzung. Die ursprüngliche Stahlrahmenkonstruktion blieb erhalten, während gezielte architektonische Eingriffe das Gebäude für eine moderne Arbeitsweise transformierten. Dabei wurde besonders auf eine flexible Nutzung geachtet, sodass die Räume sich wandelnden Anforderungen gerecht werden können (Timber Development UK, 2019).



Abb. 31:
Blick auf das Bestandsgebäude in London

Flexible Nutzung

Die neuen Büroflächen wurden so gestaltet, dass sie sich leicht umstrukturieren lassen und unterschiedliche Nutzungsanforderungen ermöglichen. Offene, kollaborative Arbeitsbereiche bieten eine kreative Umgebung, während Besprechungsräume und Rückzugsorte für konzentriertes Arbeiten sorgen.

Die gastronomischen Bereiche wie Bar und Café sind nicht nur den Mitarbeitern vorbehalten, sondern stehen auch der Öffentlichkeit zur Verfügung, wodurch das Gebäude eine zentrale Rolle im Stadtviertel einnimmt. Zusätzlich wurden multifunktionale Räume geschaffen, die für Veranstaltungen, Pop-up-Stores oder temporäre Installationen genutzt werden können (Timber Development UK, 2019).

Nachhaltige Bauweise

Die Revitalisierung des Gebäudes folgte einem konsequent nachhaltigen Ansatz, bei dem bestehende Materialien weitestgehend wiederverwendet wurden. Die originalen Bodenbeläge aus Mahagoni und Teak, kunstvolle Metallarbeiten sowie die historische Ziegelfassade wurden sorgfältig restauriert. Große Dachfenster sorgen für eine optimale Nutzung des Tageslichts und reduzieren so den Energieverbrauch.

Die Materialwahl spielte eine entscheidende Rolle, um eine langlebige, ökologische Bauweise zu gewährleisten. Die tragende Struktur der neuen Dachkonstruktion besteht aus PEFC-zertifizierter europäischer Eiche aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern in Frankreich. Die Dachverkleidung wurde aus Kupfer-Grünschindeln gefertigt, einem Material, das nicht nur ästhetisch ansprechend, sondern auch äußerst langlebig ist (Timber Development UK, 2019).

Verwendung von Bauteilen aus der Region

Um den ökologischen Fußabdruck des Bauprojekts zu minimieren, wurden möglichst viele Materialien aus der näheren Umgebung bezogen. Das verwendete Eichenholz stammt aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern der Loire-Region in Frankreich. Zudem wurden zahlreiche regionale Handwerker und Künstler in das Projekt

eingebunden, um maßgeschneiderte Möbel, Metallarbeiten und dekorative Elemente zu gestalten (Timber Development UK, 2019).

Demontierbare Konstruktionen

Die architektonischen Elemente der neuen Dachstruktur wurden so konzipiert, dass sie bei Bedarf leicht demontiert oder umgebaut werden können. Die Dachpavillons bestehen aus modularen Eichenrahmen, die flexibel angepasst werden können. Zusätzlich wurden die tragenden Säulen aus massiver Eiche hohl gefertigt, um Spannungsrisse zu vermeiden und eine spätere Umgestaltung der Tragstruktur zu erleichtern (Timber Development UK, 2019).

Prozesshaftes Bauen

Der Bauprozess wurde bewusst offen gestaltet, um während der Umsetzung flexibel auf neue Erkenntnisse und Herausforderungen reagieren zu können. In kreativen Workshops mit Architekten, Ingenieuren und Handwerkern wurden individuelle Lösungen für das Gebäude entwickelt. Historische Schichten wurden freigelegt und gezielt in das neue Design integriert, sodass Alt und Neu in einem harmonischen Zusammenspiel miteinander verschmelzen (Open House Festival, 2017).

Komfortstandards und Suffizienz

Die Kombination aus historischen Elementen und modernen Ergänzungen führt zu einer hochwertigen, aber ressourcenschonenden Arbeitsumgebung. Große Dachfenster sorgen für natürliche Beleuchtung und eine angenehme Atmosphäre, während die Verwendung von Massivholz den Räumen eine warme, einladende Ästhetik verleiht. Zusätzlich bieten die neugestalteten Dachterrassen Erholungs- und Begegnungsräume für Mitarbeiter und Besucher (Open House Festival, 2017).

Wirtschaftliche Nachhaltigkeit

Das Department Store-Gebäude ist nicht nur ein Bürokomplex, sondern auch ein wirtschaftlich tragfähiges Gesamtkonzept. Die Einzelhandelsflächen im Erdgeschoss bieten lokalen Unternehmen eine Plattform und tragen

zur wirtschaftlichen Belebung des Viertels bei. Durch die flexible Nutzung der Räumlichkeiten entstehen nachhaltige Einnahmequellen, während das Gebäude als architektonisches Wahrzeichen Brixtons zur kulturellen und wirtschaftlichen Aufwertung des Viertels beiträgt (Open House Festival, 2017).

Fazit

Die Revitalisierung des Department Store in Brixton zeigt eindrucksvoll, wie historische Gebäude zukunftsfähig umgestaltet werden können. Die Verbindung von architektonischer Tradition, modernen Arbeitsstandards und ökologischen Prinzipien macht das Projekt zu einem Modell für nachhaltige Stadtentwicklung. Durch die behutsame Restaurierung der historischen Substanz, den gezielten Einsatz nachhaltiger Materialien und eine anpassungsfähige Raumgestaltung konnte ein Gebäude mit einzigartigem Charakter geschaffen werden, das nicht nur funktional, sondern auch ästhetisch überzeugt (Timber Development UK, 2019).

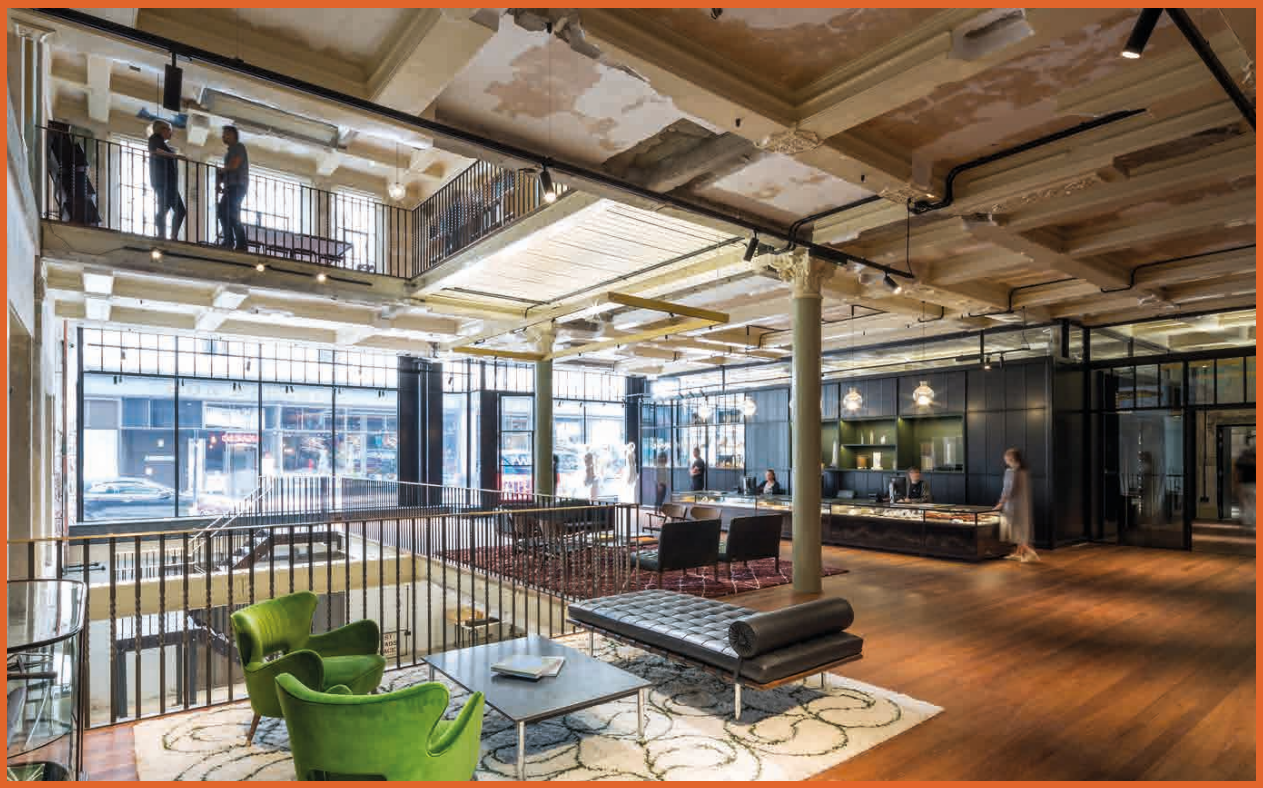


Abb. 32: Umnutzng mit behutsamen Belassen der Bestands-Tragstruktur; Austausch durch gezielte Einschnitte

3.3.5 Karreveld Secondary school and sports center, AgwA, Brüssel, 2018

Das Projekt Karreveld 2 ist ein herausragendes Beispiel für nachhaltige Architektur und die intelligente Umnutzung bestehender Bauten. In Molenbeek-Saint-Jean, einem dicht besiedelten und sozial vielfältigen Stadtteil von Brüssel, wurde ein ehemaliges Bürogebäude in eine moderne Sekundarschule mit Sporthalle und Cafeteria umgewandelt. Die Nachbarschaft ist geprägt von einer hohen Bevölkerungsdichte, einer multikulturellen Gemeinschaft und einer angespannten sozialen Infrastruktur. Der Mangel an Schulplätzen war in der Region besonders gravierend, sodass das Projekt nicht nur einen architektonischen, sondern auch einen gesellschaftlichen Mehrwert bietet.

Das Architekturbüro AgwA setzte auf ressourcenschonendes Bauen, wirtschaftliche Nachhaltigkeit und flexible Nutzungsmöglichkeiten. Durch gezielte Eingriffe



Abb. 33: Wettbewerbsbezogene Darstellung des Grundstücks in Brüssel

konnte die bestehende Gebäudestruktur erhalten und gleichzeitig an die Anforderungen einer modernen Bildungsstätte angepasst werden. Der Erweiterungsbau wurde so konzipiert, dass er den öffentlichen Raum aktiviert, indem er neue Sichtbeziehungen zur Straße schafft und die Sporthalle auch außerhalb der Schulzeiten für die Gemeinschaft nutzbar macht.

Mit dem nachhaltigen Ansatz wurde das Gebäude nicht nur energieeffizient saniert, sondern auch auf eine zukunftsfähige Nutzung ausgelegt. Durch modulare Bauelemente, nachbarschaftliche Integration und eine bewusste Materialwahl entstand ein Schulkomplex, der sowohl den Bildungsbedürfnissen als auch den sozialen Anforderungen des Stadtviertels gerecht wird (Puttkamer, 2023).

Transformation of Space
Das Projekt Karreveld 2 zeigt exemplarisch, wie ein ehemaliges Bürogebäude in eine moderne Sekundarschule mit Sporthalle und Cafeteria umgewandelt werden kann. Durch eine geschickte Neustrukturierung wurde das bestehende Gebäude erhalten und funktional an die neuen Anforderungen angepasst. Ein neuer Baukörper entlang der Grundstücksgrenze ergänzt den Bestand und schafft neue Nutzungsmöglichkeiten, während gleichzeitig die vorhandene Gebäudestruktur weitestgehend beibehalten wurde (AgwA, 2018).

Minimieren von Abfällen
AgwA setzte auf eine ressourcenschonende Renovierung, indem möglichst viele Bauelemente des Bestandsgebäudes weiterverwendet wurden. So wurden vorhandene Räume und Materialien genutzt, anstatt neue zu verbauen. Beispielsweise wurden bestehende Oberflächen und Installationen übernommen und durch flexible Trennwände ergänzt, wodurch der Materialeinsatz reduziert wurde (AgwA, 2018).

Nachhaltige Bauweise
Der Umbau erfolgte unter Berücksichtigung ökologischer Prinzipien. Die Wiederverwendung des Bestands-



Abb. 34: Blick in den Flur mit den alt, aber neu eingesetzten Bürotrennwänden und der nicht thermisch ertüchtigten Fassade

gebäudes sparte Ressourcen und vermied unnötige Abbrucharbeiten. Darüber hinaus wurden Materialien mit geringer Umweltbelastung verwendet, um den ökologischen Fußabdruck des Projekts zu minimieren (AgwA, 2018).

Flexible Nutzung

Die Schule wurde so gestaltet, dass sie sich künftigen Anforderungen anpassen kann. Die modulare Bauweise mit leichten Trennwänden ermöglicht eine flexible Raumaufteilung, sodass die Nutzung der Räume ohne größere bauliche Eingriffe verändert werden kann. Auch die Sporthalle wurde so positioniert, dass sie unabhängig vom Schulbetrieb genutzt werden kann und somit eine zusätzliche Funktion für die Gemeinschaft im Stadtteil erfüllt (Puttkamer, 2023).

Wirtschaftliche Nachhaltigkeit

Mit einem begrenzten Budget wurde ein effizienter und nachhaltiger Bau realisiert. Durch den gezielten Einsatz von kostengünstigen, aber langlebigen Materialien so-

wie die Wiederverwendung bestehender Bausubstanz konnten die Kosten minimiert werden. Zudem trägt die multifunktionale Nutzung einzelner Gebäudeteile zur langfristigen Wirtschaftlichkeit bei (Puttkamer, 2023).

Komfortstandards und Suffizienz
Bei der Planung der Schule wurde Wert auf großzügige Treppenhäuser und offene Gemeinschaftsflächen gelegt, die eine angenehme und funktionale Lernumgebung schaffen. Gleichzeitig wurde auf eine suffiziente Bauweise geachtet, die mit minimalem Ressourcenverbrauch ein hohes Maß an Komfort und Funktionalität bietet (AgwA, 2018).

Prozesshaftes Bauen
Das Projekt wurde schrittweise umgesetzt, um eine möglichst schnelle Inbetriebnahme der Schule zu ermöglichen. In einer ersten Phase wurden Klassenzimmer in einem bestehenden Gebäudeteil eingerichtet, bevor die Erweiterung erfolgte. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine effiziente Nutzung der vorhandenen Strukturen und eine zügige Umsetzung des Projekts (AgwA, 2018).

3.3.6 Bewertung der Fallbeispiele

Nachhaltige Architektur orientiert sich zunehmend an Konzepten, die eine längere Nutzungsdauer, ressourcenschonende Bauweisen und flexible Strukturen ermöglichen. Die Kategorien Adaptivität, Zirkularitätund das Steward Brands Schichtenmodell sind dabei zentrale Bewertungsmaßstäbe, um Gebäude hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit zu analysieren.

Adaptivität: Die Fähigkeit zur Transformation
Ein adaptives Gebäude zeichnet sich durch seine Flexibilität und Transformationsfähigkeit aus. Es kann auf veränderte Nutzungsanforderungen reagieren, ohne dass umfangreiche bauliche Eingriffe erforderlich sind. Dies geschieht beispielsweise durch offene Grundrisse, modulare Strukturen oder wiederverwendbare Bauelemente.

- Department Store Brixton zeigt eine hohe Adaptivität, da ein ehemaliges Kaufhaus in ein multifunktionales Gebäude mit Büros, Einzelhandel und Gastronomie umgewandelt wurde. Die Räume sind flexibel nutzbar, und die architektonische Gestaltung ermöglicht eine weitere Anpassung in der Zukunft.
- Karreveld Secondary School weist ebenfalls eine hohe Adaptivität auf, da ein ehemaliges Bürogebäude in eine Schule mit Sportzentrum umgewandelt wurde. Die Raumaufteilung kann durch modulare Trennwände angepasst werden, und die Sporthalle ist auch außerhalb der Schulzeiten nutzbar.
- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture in Nantes nutzt eine adaptive Gestaltung, indem es große, offene Räume für verschiedene Bildungsformate bereitstellt.
- Gebäude Anton zeigt eine mittlere Adaptivität, da einige flexible Elemente vorhanden sind, aber die Grundstruktur weniger verändert wurde.

Bewertung: Die höchsten Werte in der Kategorie Adaptivität erhalten das Department Store Brixton und die Karreveld Secondary School, da sie erfolgreich bestehende Strukturen in neue Nutzungskonzepte überführt haben.

Nachhaltige Architektur orientiert sich zunehmend an Konzepten, die eine längere Nutzungsdauer, ressourcenschonende Bauweisen und flexible Strukturen ermöglichen. Die Kategorien Adaptivität, Zirkularitätund das Steward Brands Schichtenmodell sind dabei zentrale Bewertungsmaßstäbe, um Gebäude hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit zu analysieren.

Adaptivität: Die Fähigkeit zur Transformation

Ein adaptives Gebäude zeichnet sich durch seine Flexibilität und Transformationsfähigkeit aus. Es kann auf veränderte Nutzungsanforderungen reagieren, ohne dass umfangreiche bauliche Eingriffe erforderlich sind. Dies geschieht beispielsweise durch offene Grundrisse, modulare Strukturen oder wiederverwendbare Bauelemente.

	BAHNHOF SAN CRISTO-FORO	ECOLE NATIONA-LE SUPER-IEURE	GEBÄUDE ANTON	DEPART-MENT STORE BRIXTON	KARRE-VELD SECON-DARY SCHOOL
ADAPTIV					
Transfor-mation of Space	++	++	++	++	++
Flexible, partizi-pative Nutzung	++	++	++	++	++
Nachhal-tige Bau-weise	++	++	++	++	++
ZIRKULÄR					
Form follows availability					
Minimie-ren von Abfällen	++	+	+	++	++
Wenige, nachhalti-ger Mate-rialien	++	++	+	++	++
Regionale Bauteile	+	++	0	++	++
Form follows disassembly					
Entflech-tung des Gebäudes	++	++	+	++	++
Demon-tierbare Konstruk-tionen	++	++	0	++	++
Rethink standards					
Prozess-haftes Bauen	++	++	+	++	++
Wirt-schaftli-che Nach-haltigkeit	++	+	++	++	++
Komfort-standards und Suf-fizienz	++	++	+	++	++
STEWARD BRANDS SCHICHTEN MODELL?					
Erfüllt oder nicht erfüllt?					
Ja/Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tab. 7: Bewertungsmatrix zu den historischen und gegenwärtigen Beispielen

- Department Store Brixton zeigt eine hohe Adaptivität, da ein ehemaliges Kaufhaus in ein multifunktionales Gebäude mit Büros, Einzelhandel und Gastronomie umgewandelt wurde. Die Räume sind flexibel nutzbar, und die architektonische Gestaltung ermöglicht eine weitere Anpassung in der Zukunft.
- Karreveld Secondary School weist ebenfalls eine hohe Adaptivität auf, da ein ehemaliges Bürogebäude in eine Schule mit Sportzentrum umgewandelt wurde. Die Raumaufteilung kann durch modulare Trennwände angepasst werden, und die Sporthalle ist auch außerhalb der Schulzeiten nutzbar.
- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture in Nantes nutzt eine adaptive Gestaltung, indem es große, offene Räume für verschiedene Bildungsformate bereitstellt.
- Gebäude Anton zeigt eine mittlere Adaptivität, da einige flexible Elemente vorhanden sind, aber die Grundstruktur weniger verändert wurde.

Bewertung: Die höchsten Werte in der Kategorie Adaptivität erhalten das Department Store Brixton und die Karreveld Secondary School, da sie erfolgreich bestehende Strukturen in neue Nutzungskonzepte überführt haben.

Zirkularität: Nachhaltige Bauweise und Materialkreisläufe

Zirkuläre Architektur setzt auf Wiederverwendbarkeit von Materialien, Reduktion von Abfällen und eine nachhaltige Materialwahl. Ziel ist es, die Umweltbelastung zu minimieren und Gebäude so zu konzipieren, dass ihre Bestandteile später weitergenutzt oder recycelt werden können.

- Department Store Brixton überzeugt durch die bewusste Restaurierung der historischen Substanz und den Einsatz nachhaltiger Materialien wie PEFC-zertifiziertem Holz und langlebigem Kupfer für die Dachkonstruktion.
- Karreveld Secondary School folgt einer klar zirkulären Strategie, indem das bestehende Gebäude weitge-

hend erhalten wurde und nachwachsende oder recycelte Materialien verwendet wurden.
- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture verfolgt ebenfalls einen nachhaltigen Ansatz mit minimalem Materialeinsatz und einer flexiblen Raumaufteilung.
- Gebäude Anton zeigt eine geringere Zirkularität, da nicht so viele kreislauffähige Materialien eingesetzt wurden.

Bewertung: In dieser Kategorie liegen das Department Store Brixton und die Karreveld Secondary School vorne, da sie konsequent auf Wiederverwendung und nachhaltige Materialwahl setzen.

Steward Brands Schichtenmodell: Anpassungsfähigkeit über Zeit

Das Steward Brands Schichtenmodell beschreibt Gebäude als eine Zusammensetzung verschiedener Schichten, die unterschiedlich schnell verändert werden können – von der Tragstruktur über die Fassade bis hin zur Möblierung. Ein Gebäude gilt als nachhaltig, wenn diese Schichten unabhängig voneinander angepasst werden können.

- Department Store Brixton erfüllt dieses Modell besonders gut: Die tragende Struktur blieb erhalten, während neue, flexible Schichten wie Dachpavillons und Innenausbauten ergänzt wurden.
- Karreveld Secondary School setzt ebenfalls auf schichtweise Anpassung: Die ursprüngliche Gebäudehülle wurde bewahrt, während die Innenräume flexibel gestaltet und modulare Bauelemente ergänzt wurden.
- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture zeigt ebenfalls eine klare Trennung von tragenden und veränderbaren Elementen.
- Gebäude Anton ist weniger stark nach diesem Modell konzipiert, da die innere Struktur weniger flexibel ist.

Bewertung: Department Store Brixton und Karreveld Secondary School setzen das Schichtenmodell konsequent um, da sie bestehende Strukturen bewahren und gleichzeitig modulare, veränderbare Elemente hinzufügen.

Fazit: Eine differenzierte Bewertung der Gebäude
Insgesamt zeigen alle analysierten Gebäude eine Kombination aus Adaptivität, Zirkularität und dem Steward Brands Schichtenmodell. Besonders hervorzuheben sind:

1. Department Store Brixton als ein Vorzeigeprojekt für flexible Transformation, nachhaltige Materialnutzung und eine schichtweise Anpassbarkeit.
2. Karreveld Secondary School als Beispiel für nachhaltige Umnutzung, ressourcenschonendes Bauen und soziale Integration.
3. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture mit einem starken Fokus auf Raumflexibilität und ökologischer Materialwahl.
4. Gebäude Anton, das zwar nachhaltige Aspekte berücksichtigt, aber weniger stark auf Anpassungsfähigkeit und Materialkreisläufe setzt.

Sowohl das Department Store Brixton als auch die Karreveld Secondary School zeigen, dass historische oder bestehende Gebäude durch geschickte Planung zukunftsfähig und nachhaltig transformiert werden können. Sie bieten damit eine Blaupause für ressourcenschonendes, flexibles Bauen im urbanen Raum.

3.4 Fallstudie Kalkulation im zirkulären Bauen

Dieses Abschnitt analysiert am Beispiel des Projekts K.118 in Winterthur die wirtschaftliche Tragfähigkeit zirkulären Bauens. Untersucht wird, ob wiederverwendete Bauteile kostenneutral gegenüber Neubaukomponenten eingesetzt werden können. Die Analyse verbindet Materialwahl, Rückbau und Planung mit einer differenzierten Bewertung auf Bauteilebene und verdeutlicht, unter welchen Bedingungen ReUse wirtschaftlich sinnvoll ist.



Abb. 35:
Blick auf die
Tragstruktur der
ReUse Stahlträger

3.4.1 K.118 Winterthur

Im Projekt K.118 in Winterthur wurde systematisch untersucht, ob sich Baukosten mit wiederverwendeten Bauteilen im Vergleich zu neuen Materialien wirtschaftlich darstellen lassen. Dabei wurden zehn unterschiedliche Bauteile hinsichtlich ihrer tatsächlichen Kosten analysiert. Neben den reinen Materialkosten flossen auch Aufwendungen für Planung, Dokumentation, Rückbau, Transport und Lagerung in die Bewertung ein (Baubüro in situ, 2022).

Die Ergebnisse zeigen, dass Wiederverwendung nicht pauschal günstiger ist. So war das rückgebaute Stahltragwerk aus dem Lysbüchel-Areal trotz geringer Bearbeitungsanforderungen teurer als ein neues Trägersystem – hauptsächlich aufgrund des erhöhten Transport- und Wiedereinbauaufwands (Baubüro in situ, 2022). Bei ein-

fachen Holzelementen wie Bodenriemen war der manuelle Aufwand wirtschaftlich nur in Einzelfällen vertretbar, insbesondere bei hochwertigen Hölzern (Madaster, 2023).

Demgegenüber erwiesen sich komplexe, gut erhaltene Bauteile wie Fenster oder Türen als wirtschaftlich vorteilhaft. Voraussetzung war ein unbeschädigter Rückbau und eine unkomplizierte Wiederverwendung. Diese Bauteile bieten aufgrund ihrer Fertigungsqualität und Marktgängigkeit konkrete Einsparpotenziale gegenüber Neubauprodukten (Baubüro in situ, 2022).

Das Projekt K.118 macht deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung stark vom jeweiligen Bauteil abhängt. Maßgeblich sind Faktoren wie Herstellungskomplexität, Zustand, Rückbauaufwand und die sogenannte „embodied craft“ – also der im Bauteil enthaltene Arbeits- und Energieeinsatz. Diese Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Kostenplanung zirkulärer Bauprojekte (Madaster, 2023).

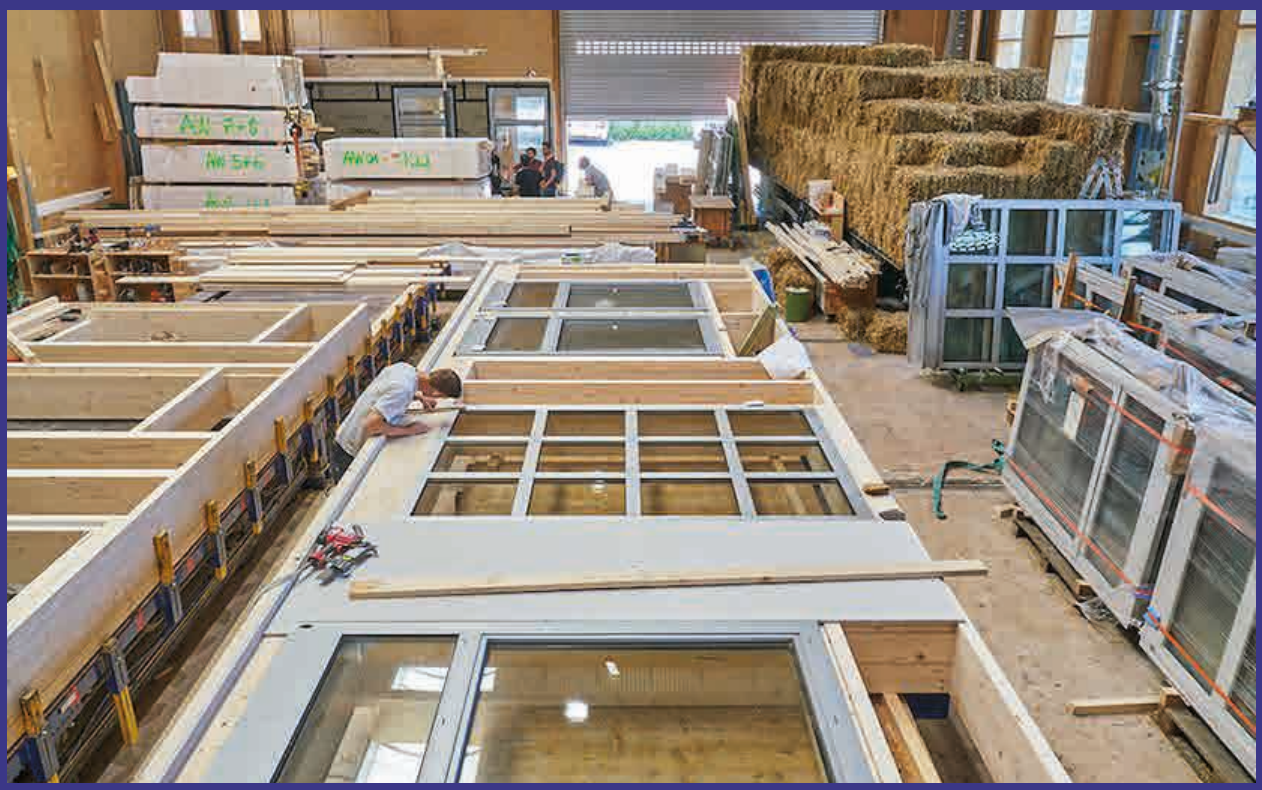
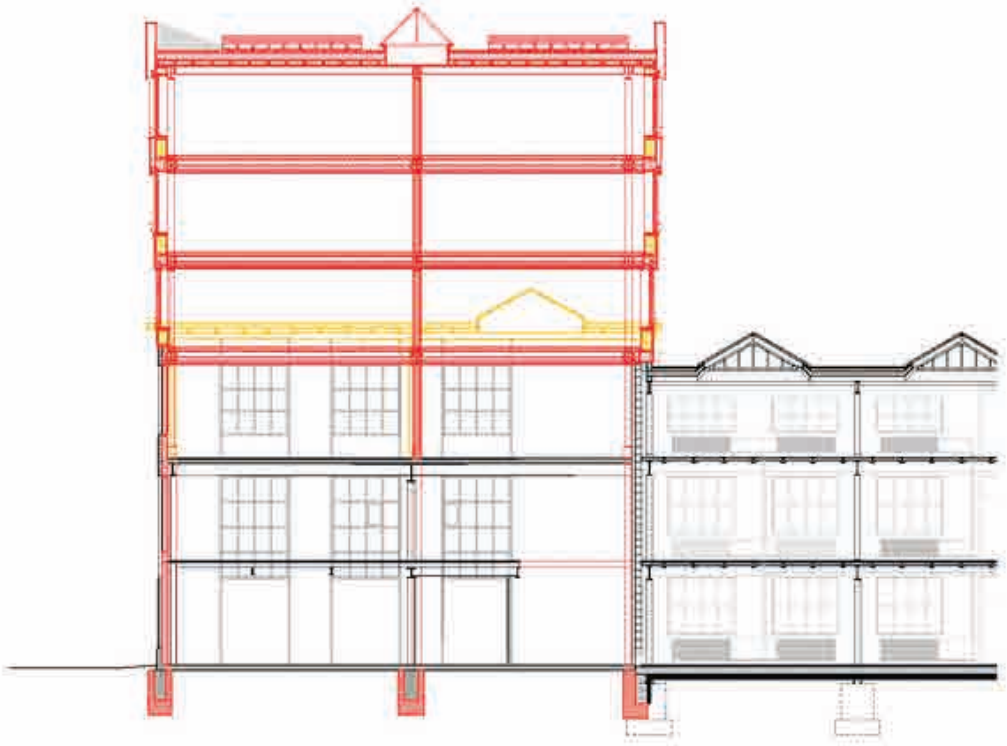


Abb. 36:
Vorfertigung
der Fertigteil
Elemente im Werk



Schnitt B - B

0 1 3 5 10 m

Abb. 37: Schnitt mit Darstellung der abgerissenen und neuen Elemente

Foto: Eigenes

4 ANALYSE DES FELIX-FECHENBACH-BERUFSKOLLEGS

Das Felix-Fechenbach-Berufskolleg (FFB) in Detmold ist eine gewerblich-technisch ausgerichtete Bildungseinrichtung mit etwa 2.400 Schülern und rund 110 Lehrkräften. Es vereint verschiedene Schulformen unter einem Dach, darunter Berufsschule, Berufsfachschule, Fachschule und Berufliches Gymnasium, und ermöglicht Abschlüsse vom Hauptschulabschluss bis zum Abitur.

Die fünf Fachbereiche des FFB umfassen Metalltechnik und Versorgungstechnik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Holztechnik und Baudenkmalpflege, Ernährungs- und Versorgungsmanagement sowie Körperpflege, und Sozial- und Gesundheitswesen. Die

Berufe sind auf die verschiedenen Gebäude aufgeteilt. So ist in Gebäude II die Abteilung für das Sozialwesen und in Gebäude III Ernährung und Hauswirtschaft/Körperpflege. In dem Gebäude IV sind in dem Erd- und Untergeschoss die Abteilung der Metalltechnik und in den Obergeschossen die Abteilung der Elektrotechnik zu finden. Insgesamt werden in dem Gebäude IV 800 SchülerInnen unterrichtet. Ebenso wird auch die Berufsabteilung Holztechnik angeboten. Diese befindet sich jedoch in einem anderen Schulgebäude in der Klingenbergstraße in Detmold. Diese Vielfalt bietet den Schülern eine breite Palette an beruflichen Ausbildungsmöglichkeiten.

Die Ursprünge der Schule reichen bis ins Jahr 1846 zurück, als auf Initiative des Detmolder Gewerbevereins eine Gewerbeschule gegründet wurde. Seitdem hat sich die Institution kontinuierlich weiterentwickelt und verschiedene Umbenennungen erfahren, bis sie schließlich den Namen Felix-Fechenbach-Berufskolleg erhielt. Namensgeber ist der Journalist und Sozialdemokrat Felix Fechenbach, der in den 1920er und 1930er Jahren in Detmold wirkte und 1933 ermordet wurde.

4.1 Makro-Analyse

4.1.1 Städtebauliche Einordnung

Schwarzplan

Das Gebäude 4 des Felix-Fechenbach-Berufskollegs ist in eine von kleinteiligen, linearen Strukturen geprägte Umgebung eingebettet. Es befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Felix-Fechenbach-Berufskollegs Gebäude 1-3, dessen Baukörper sich als kammartige, lineare Großstruktur manifestiert. Im Gegensatz zu dieser betont das Felix-Fechenbach-Berufskolleg IV eine eher massivere Struktur mit linearen Ansätzen. In dem Unter- und Erdgeschoss wird die kammartige Struktur des Nachbargebäudes aufgegriffen, jedoch nicht insofern, dass die Gebäudetiefe der Gebäude in der Nachbarschaft aufgegriffen wird. Das FFB IV zeigt eine aufgedoppelte Kamm-



Abb. 38:
Schwarzplan
maßstabslos

struktur mit Nord-Süd-Ausrichtung. Der Riegel der Obergeschosse ragt in Ost-West-Ausrichtung heraus und schafft so einen besonderen Blickfang, in der ansonsten harmonisch ausgerichteten Nachbarschaft mit Süd-West Orientierung. Diese Einbindung in eine eher heterogene Parzellierung unterscheidet es von anderen großformatigen Bildungsbauten, wie etwa der Technischen Hochschule, die sich durch eine einseitige Öffnung auszeichnet.

Verkehr

Die verkehrliche Erschließung des Standorts erfolgt in einem verkehrsberuhigten Bereich, wodurch eine hohe Aufenthaltsqualität gewährleistet wird. Die Parkraumnutzung ist vorwiegend suburban organisiert, mit Stellplätzen am Straßenrand, während eine direkte Anbindung an die Ortsdurchfahrt der Bielefelder Straße nicht besteht. Die angrenzende 30er-Zone unterstreicht den verkehrsberuhigten Charakter des Quartiers. Eine Anbindung an den öffentlichen Nahverkehr ist durch eine nahegelegene Bushaltestelle gegeben, wobei der Weg zur Haltestelle fußläufig gestaltet ist. Auch die fußläufige Erreichbarkeit für Anwohner und Bahnnutzer ist gegeben, wenn auch mit einer gewissen Distanz verbunden. Durch die Lage abseits einer Hauptverkehrsader gibt es keine Staubereiche, wodurch der Standort eine ruhige und geschützte Lernumgebung bietet. Allerdings stellt diese beschauliche Zurückgezogenheit sicherlich auch ein gewisse „Unsichtbarkeit“ dar, weil die Berufsschule nicht direkt gefunden werden kann. Aufgrund des tiefen Einbindens in eine Wohnsiedlung ist die Orientierung und Auffindung des Gebäudes für Außenstehende erschwert und nicht als ein Leuchtturm der städtischen Bildungslandschaft zu finden.

Mieten und Geschosse

Das Berufskolleg befindet sich in einem Wohngebiet mit reiner Wohnnutzung. Die Preislage der Miet- und Kaufpreise liegt im unteren bis mittleren Segment, was durch die geringe Bebauungsdichte und die grüne Umgebung unterstrichen wird. Ein markanter Hochpunkt in der Nähe signalisiert eine dichtere Wohnbebauung, welche für die-

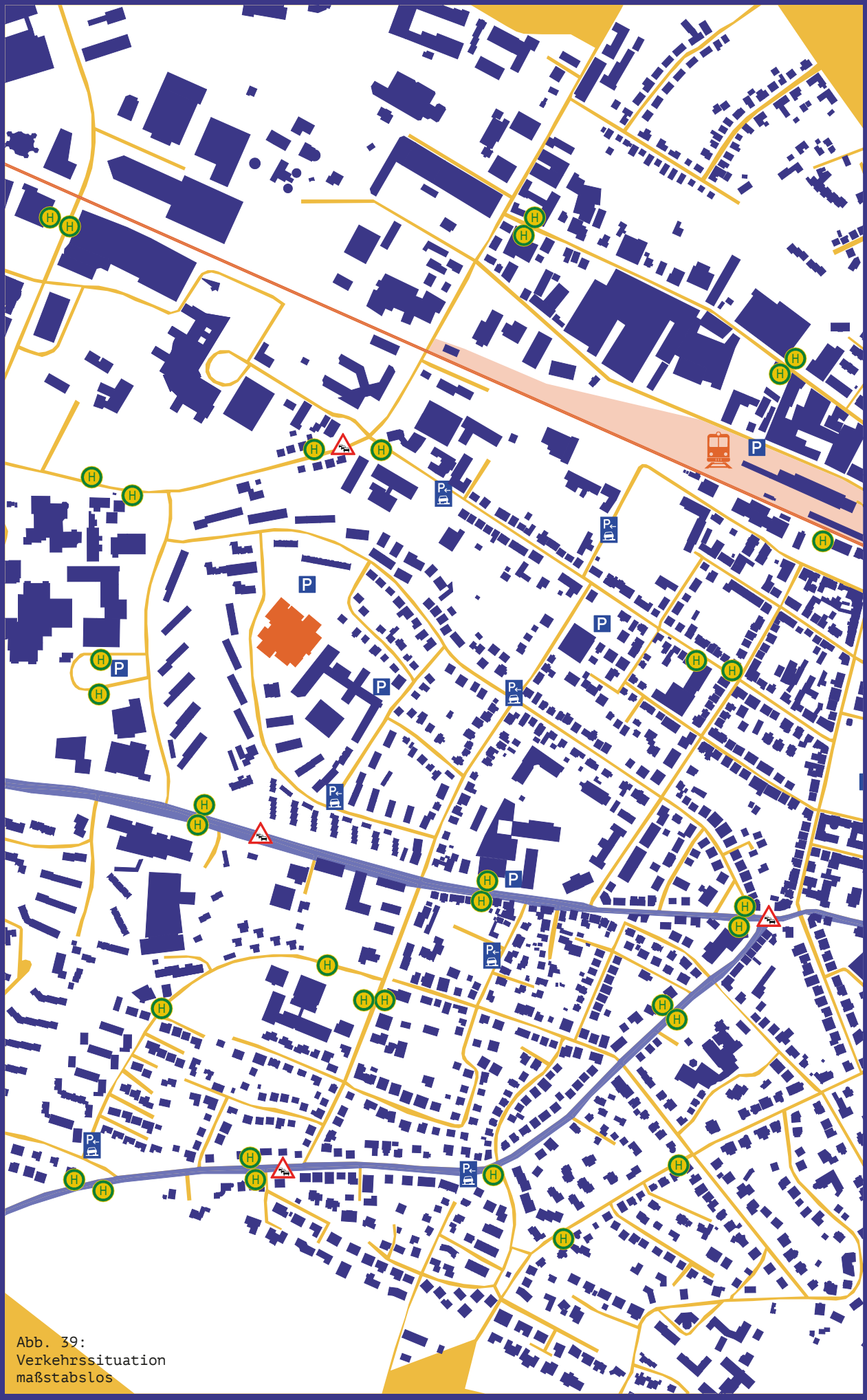


Abb. 39:
Verkehrssituation
maßstabslos

se Art von Quartier ungewöhnlich ist. Solche Hochpunkte finden sich in der Umgebung meist als identitätsstiftende Strukturen, etwa für Schulen, Kirchen oder andere öffentliche Nutzungen. Im Wohnungsbau sind Gebäude mit mehr als vier Geschossen selten anzutreffen. Städtebaulich stellt dieser Bereich zudem einen Wendepunkt in der Preisstruktur Detmolds dar: Während südlich des Standorts die Immobilienpreise noch moderat sind, steigen sie Richtung Innenstadt signifikant an, insbesondere im Kontext des historischen Stadtkerns.

Nutzungen

Das Felix-Fechenbach-Berufskolleg ist in einen klar definierten schulischen Kontext eingebunden. Es besteht eine unmittelbare funktionale Vernetzung mit weiteren Bildungseinrichtungen, darunter Sekundarschulen, Grundschulen, Hochschulen und andere Berufskollegs. Dadurch ergibt sich eine umfassende Bildungslandschaft, die zahlreiche Schulformen und Bildungswege miteinander verknüpft. Diese Vernetzung wird durch gut ausgebaute Fußwege unterstützt, die als direkte Verbindungen zwischen den Schulen dienen und zugleich Anknüpfungen an vorhandene Grünstrukturen schaffen. Auffällig ist jedoch das Fehlen einer Kita in unmittelbarer Nähe, eine für moderne Bildungslandschaften üblich gewordene Ergänzung, die eine frühe kindliche Betreuung und eine spätere schulische Anbindung vereinfacht hätte.

Trotz der Verknüpfungen an bestehende Grünstrukturen fehlt es an großflächigen öffentlichen Freiräumen. Die nächstgelegene naturnahe Erholungsmöglichkeit ist der Knochenbach, welcher für Ausflüge genutzt werden kann. Ansonsten bestehen vor allem private Grünflächen, während öffentliche Parks oder Freiräume in unmittelbarer Umgebung fehlen. Dennoch wird durch das Wegenetz eine Vernetzung der Bildungsbauten mit dem urbanen Raum geschaffen, die eine funktionale und zugleich städtebaulich Einbindung gewährleistet.



Abb. 40: Geschossigkeit und Einkommen
maßstabslos

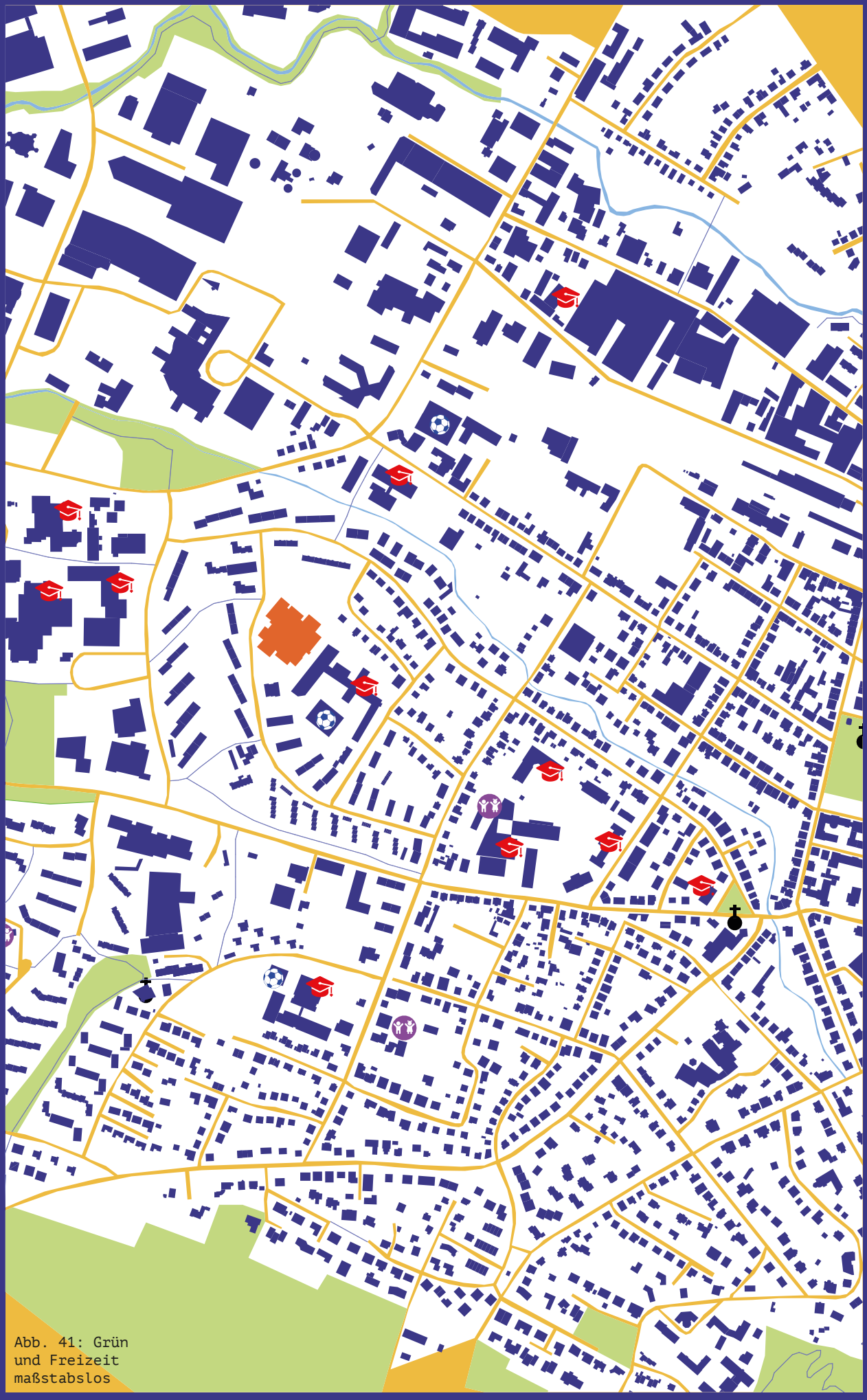


Abb. 41: Grün und Freizeit maßstabslos

4.2 Midi-Analyse

4.2.1 Historische Einordnung

Das Felix-Fechenbach-Berufskolleg, Gebäude 4, wurde 1972 im Zuge eines Architekturwettbewerbs konzipiert und errichtet. Ziel war es, die berufliche Bildung als essenziellen Bestandteil des Bildungssystems zu etablieren und durch die Nutzung der Nähe zur Sekundarschule eine flexible Ergänzungsmöglichkeit für die Berufsbildung zu schaffen. Der Entwurf ermöglichte eine Ausweitung des Bildungsangebotes, indem spezialisierte Fachbereiche wie Holz-, Metall- und Elektrophysik sowie Textil- und Bürotechnik aus den bestehenden Gebäuden 1 bis 3 in das neue Gebäude verlagert wurden.

Die bauliche Struktur wurde durch die Verbindung der einzelnen Gebäude über eine zentrale Pausenhalle mit Mensa und einem pädagogischen Zentrum gestärkt. Die Haupterschließung erfolgt aus dem Südwesten, er-

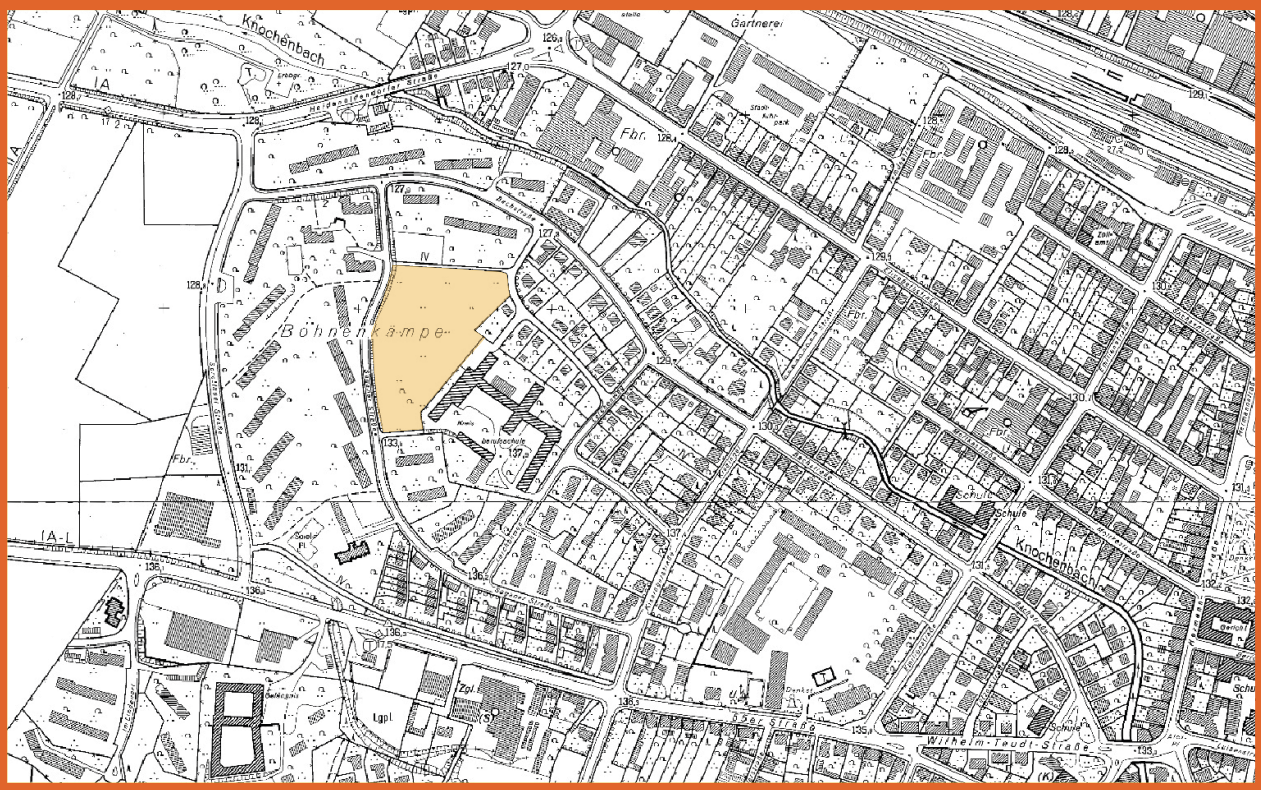
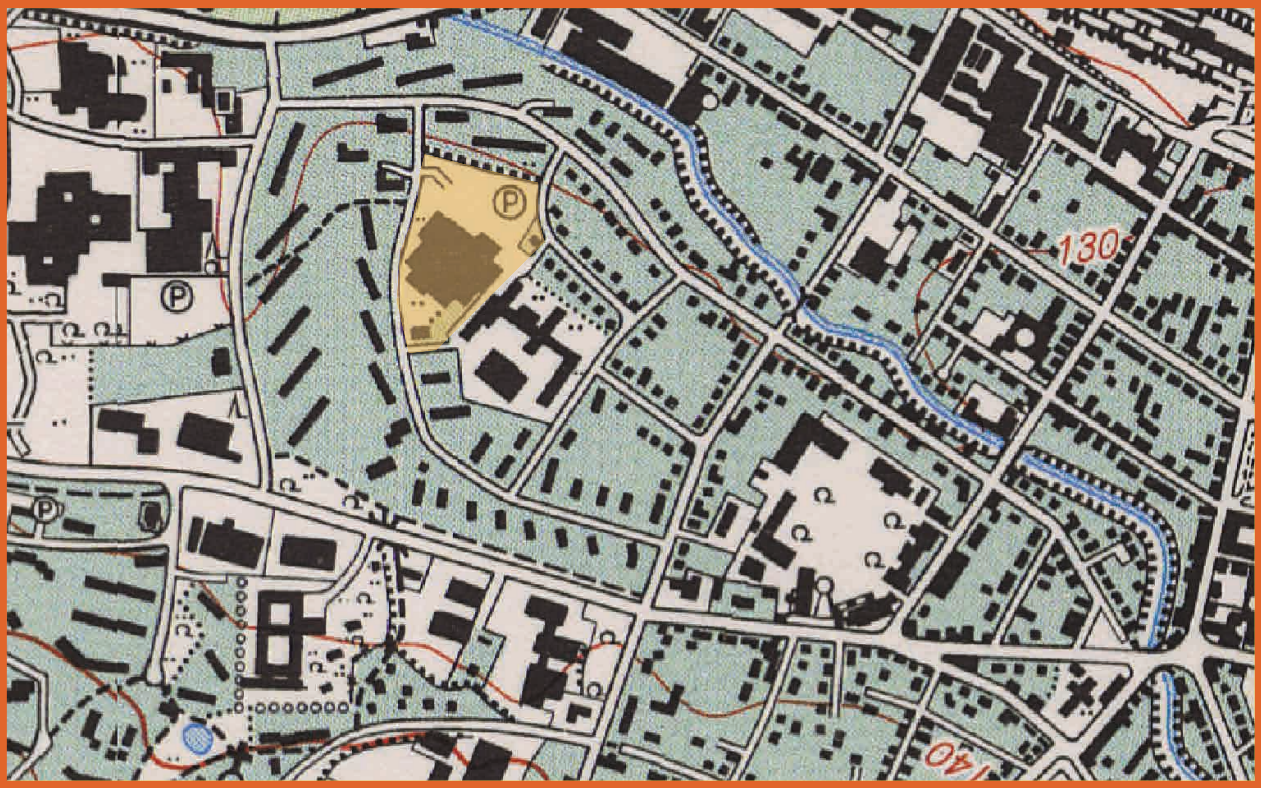


Abb. 42:
Historischer
Lageplan von 1970



Abb. 43:
Historischer
Lageplan von 1975

Abb. 44:
Historischer
Lageplan von 1995



gänzt durch eine Terrasse, während sich der Parkplatz im Norden befindet. Die Planung und Umsetzung erfolgte durch den Generalunternehmer imbau Industrielles Bauen GmbH, wobei die Fertigstellung in mehreren Bauabschnitten erfolgte. Der Bau begann 1974 und erreichte mit der Fertigstellung der Mensa und des pädagogischen Zentrums im fünften Bauabschnitt 1976 einen entscheidenden Meilenstein. Ursprünglich war zudem eine Erweiterung durch ein Palettenbauwerk mit 500 Stellplätzen sowie eine Turnhalle, eine Kindertagesstätte und eine Hausmeisterwohnung geplant, die jedoch nicht realisiert wurden.

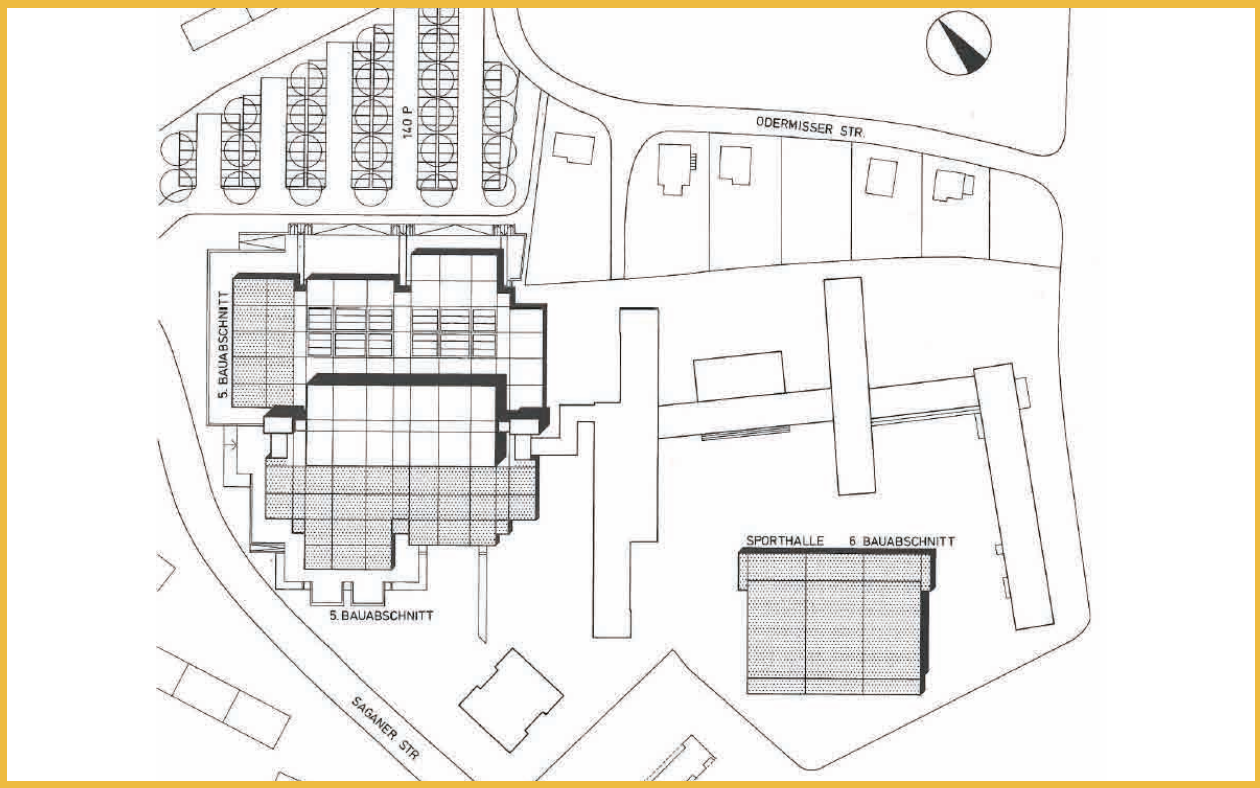


Abb. 45: Lageplan im Rahmen des wettbewerbsbezogenen Entwurfs von 1974

4.2.2 Erschließungs- und Grundrissstruktur

Die Haupterschließung des Gebäude IV des Felix-Fechenbach-Berufskollegs erfolgt über den Eingang im Süd-Westen des Gebäudes an der Saganer Straße. Das Gebäude ist über eine Treppenanlage sowie über eine Rampe erschließbar. Darüber hinaus schließt sich in der Saganer Straße auch ein Parkplatz an, der für das Gebäude IV angelegt ist.

Mit Blick auf die ehemalig angedachte Grundriss- und Gebäudestrukturentwicklung lässt sich sagen, dass sich das Gebäude architektonisch durch eine kompakte Grundrissgestaltung im Unter- und Erdgeschoss auszeichnet, die sich zum Hang hin öffnet. In den Obergeschossen wurde eine tiefe Zweibundanlage realisiert, die für eine effiziente Raumnutzung sorgt. Die Erschließung erfolgt über eine zentrale „Hauptverkehrsstraße“ oder auch genannt „Schulstraße“, welche als Verlängerung der anderen Gebäude fungiert. Drei Nebenflure gliedern

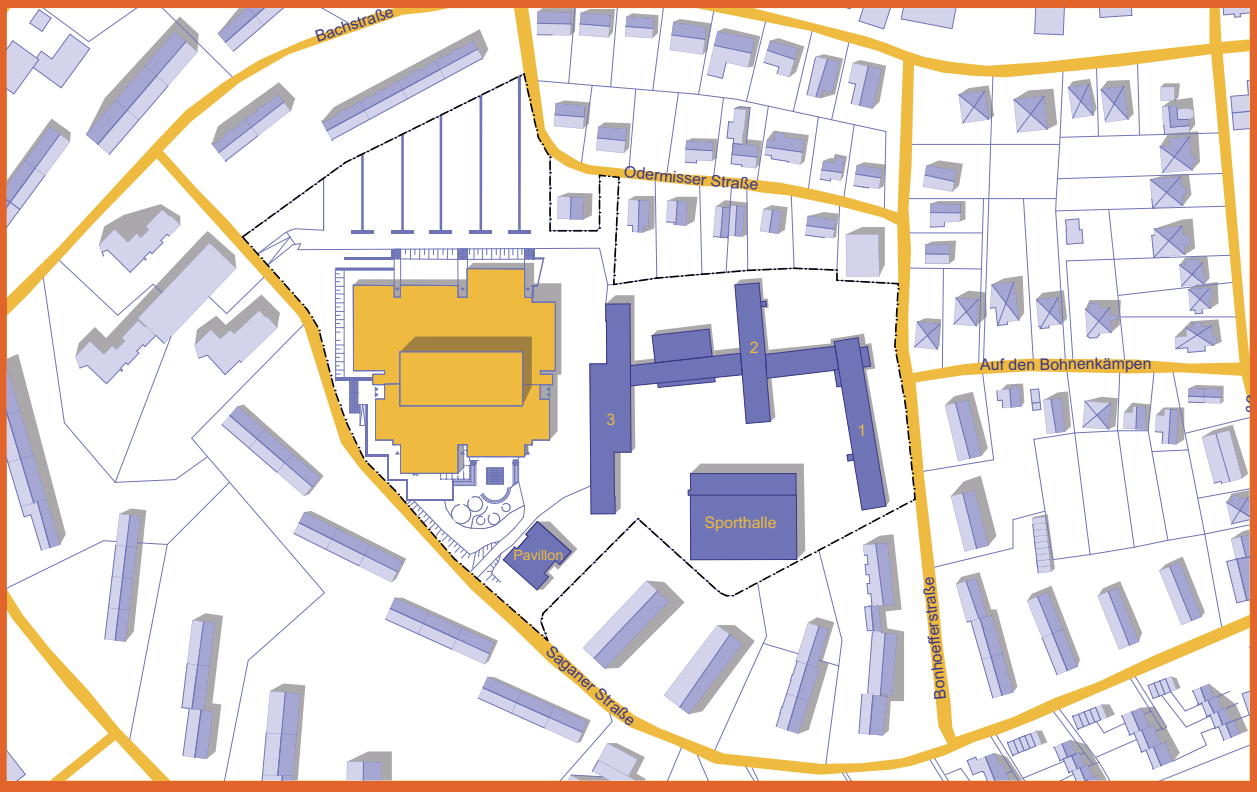


Abb. 46: Aktueller Lageplan, Maßstabslos

die Unterrichtsräume und stellen die Anbindung an das pädagogische Zentrum sowie die Außenbereiche sicher.

Die funktionale Aufteilung des Gebäudes unterstützt unterschiedliche Nutzungszonen: Der südliche Bereich ist freizeitorientiert, während der nördliche Bereich dem konzentrierten Lernen dient. Die Hauptverkehrsstraße fungiert als Kommunikationszone, Schüleraufenthaltsbereich und Präsentationsfläche.

Ehemals ist die innere Struktur ebenfalls so gedacht worden, dass im Erdgeschoss sich hochinstallierte Fachbereiche sowie fachneutrale Unterrichtsräume und Werkstätten befinden, die eine interdisziplinäre Nutzung ermöglichen. In den Obergeschossen wurden geringinstallierte Fachbereiche umgesetzt, wobei flexible Wände im Skelettbau eine Anpassung der Normalräume an bestehende Flurstrukturen erlauben. Diese Flexibilität unterstützt eine variable Raumnutzung und ermöglicht eine bedarfsgerechte Anpassung an sich wandelnde Bildungsanforderungen.

4.3 Mini-Analyse

Mit der geschaffenen Grundlage von Steward Brand soll im Folgenden auch das Berufskolleg in den verschiedenen Schichten untersucht werden. Zusätzliche Grundlage für die Untersuchung sollen auch die Ergebnisse der Schadstoffanalyse aus dem Jahre 2022, der im Jahre 2023 durchgeführten Untersuchung von Concular sowie das energetische Sanierungskonzepts von ReBuild sein.
Das Felix Fechenbach Berufskolleg IV in Detmold zeichnet sich durch eine strukturierte Bauweise aus, die verschiedene Schichten umfasst. Die Gebäudehülle, die Tragkonstruktion, die technische Gebäudeausrüstung (TGA) und der Innenausbau spielen dabei zentrale Rollen in der Konstruktion und Funktionalität des Gebäudes.

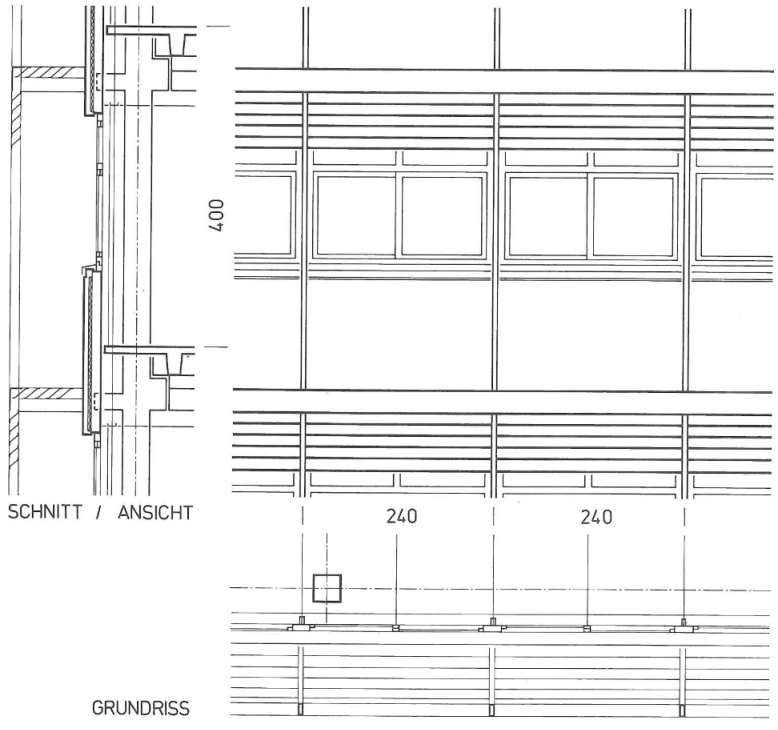
4.3.1 Schichtentrennung nach Brand: Bestand und Potenziale des Gebäudes

Gebäudehülle

Die Außenwände des Gebäudes bestehen aus einer Sandwich-Konstruktion mit Beton und mineralischer Dämmung. Diese sind als Fertigteile an das Stahlbeton-Skelett befestigt. An vereinzelten Stellen zeigen sich Schäden und Abplatzungen. Der Sonnenschutz wird durch Stahlprofile und Aluminiumlamellen gewährleistet, die an der Tragkonstruktion befestigt sind und die Fassade durchdringen. Jedoch ist der Sonnenschutz nicht individuell anpassbar und nur auf eine bestimmte Höhe befestigt. So kann man zudem auf etwa 1/3 des Fensters von oben nicht nach Draußen schauen.

Das Gebäude findet nach unten hin seinen Abschluss mit einer Stahlbetongründung und -fundamentierung.
Das Dach besteht aus einer Trapezblecheindeckung mit Bitumenabdichtung und Dämmung. Allerdings weist

Abb. 47:
Detailzeichnung
des aktuellen
Sonnenschutzes



Fassadendetail/Schnitt und Ansicht

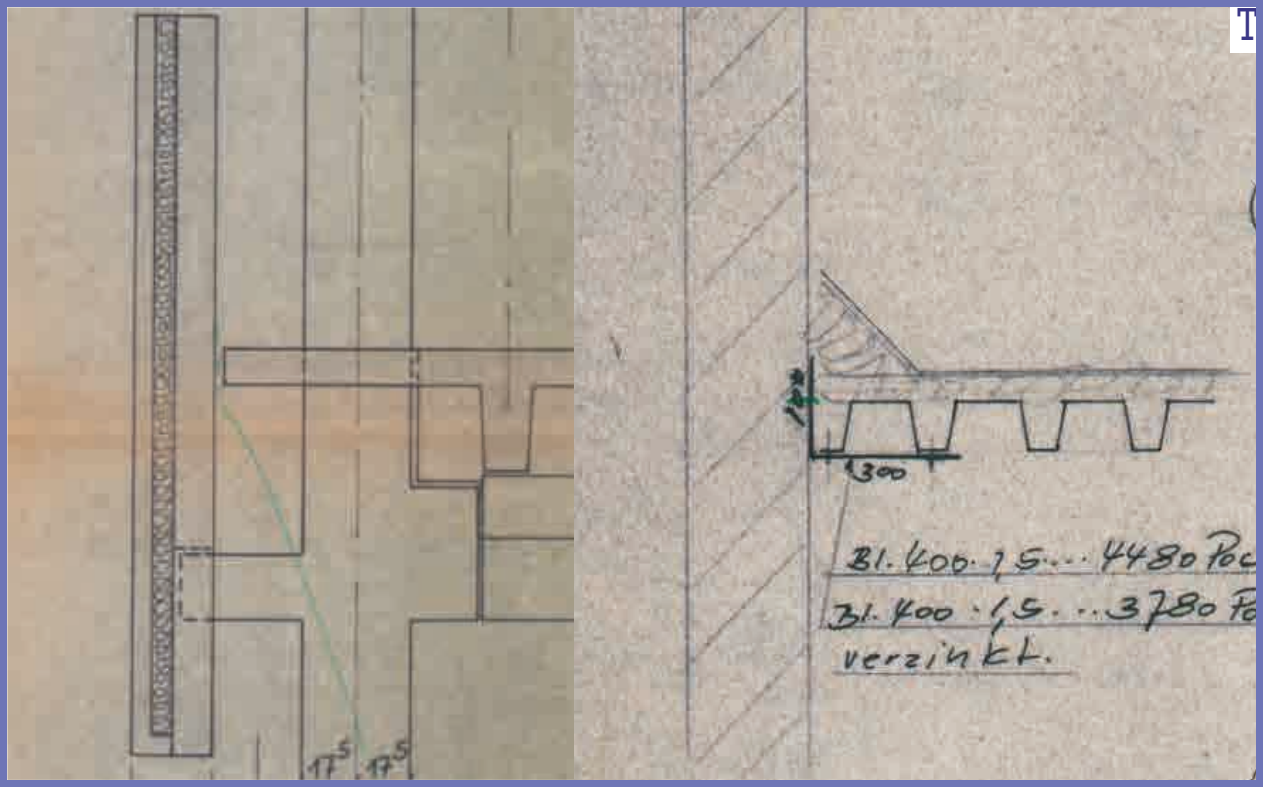


Abb. 48: Anschlussdetails Fertigteil-Fassade und Decken

es Undichtigkeiten auf, was auf eine eingeschränkte Lebensdauer hinweist.

Weitere Informationen über die Effizienz der Gebäudehülle sind im folgenden Abschnitt in Folge der Vorstellung des energetischen Sanierungskonzeptes von ReBuild zu entnehmen.

Tragkonstruktion

Die Tragkonstruktion weist eine vorgefertigte und schnell zu konstruierende Konstruktion auf. Im Kern besteht die Tragstruktur aus einer vorgefertigten Stahlbeton-Skelett-Konstruktion, auf die mit Geschossdecken aus TT-Platten und Kleinachsen mit Trogplatten positioniert sind. Dadurch wird besonders in den Bereichen der aufgehenden Obergeschosse auf eine zusätzliche Verstärkung der Konstruktion gesetzt, welche die Flexibilität der Nutzung erhöhen. Durch die Kombination von T-Trägern und Trogplatten wird eine zusätzliche Verstärkung der Konstruktion erzeugt. Trogplatten sind spezielle Stahlbeton-Deckenelemente mit länglichen Vertiefungen,

die das Eigengewicht reduzieren und gleichzeitig eine hohe Tragfähigkeit gewährleisten. Durch diese Bauweise wird Material eingespart, während die Hohlräume ideal für technische Installationen wie Kabel- und Lüftungsführungen genutzt werden können. Zudem bieten sie eine gute Schalldämmung und sind besonders für modulare Bauweisen oder Gebäude mit großen Spannweiten geeignet. In der Regel verläuft die Hauptbewehrung entlang der Plattenlängsrichtung, insbesondere in den Stegen zwischen den Trogen, um die Biegezugkräfte zu kompensieren. Zusätzlich werden Querbewehrungen eingesetzt, um die Schubkräfte aufzunehmen und die Rissbildung zu minimieren. Je nach statischen Anforderungen kann auch eine zusätzliche obere Bewehrung eingebracht werden, insbesondere an Auflagerbereichen oder in Bereichen mit hoher Punktbelastung. Im Erdgeschoss werden diese Deckenelemente ebenso bis zur ersten Achse nach den genutzten Flächen der Obergeschosse vorgesehen. Ab dann sind über dem Erdgeschoss geschweißte Stahlblechträger zu den Stahlbeton-T-Trägern verstärkend eingesetzt, um unteranderem die

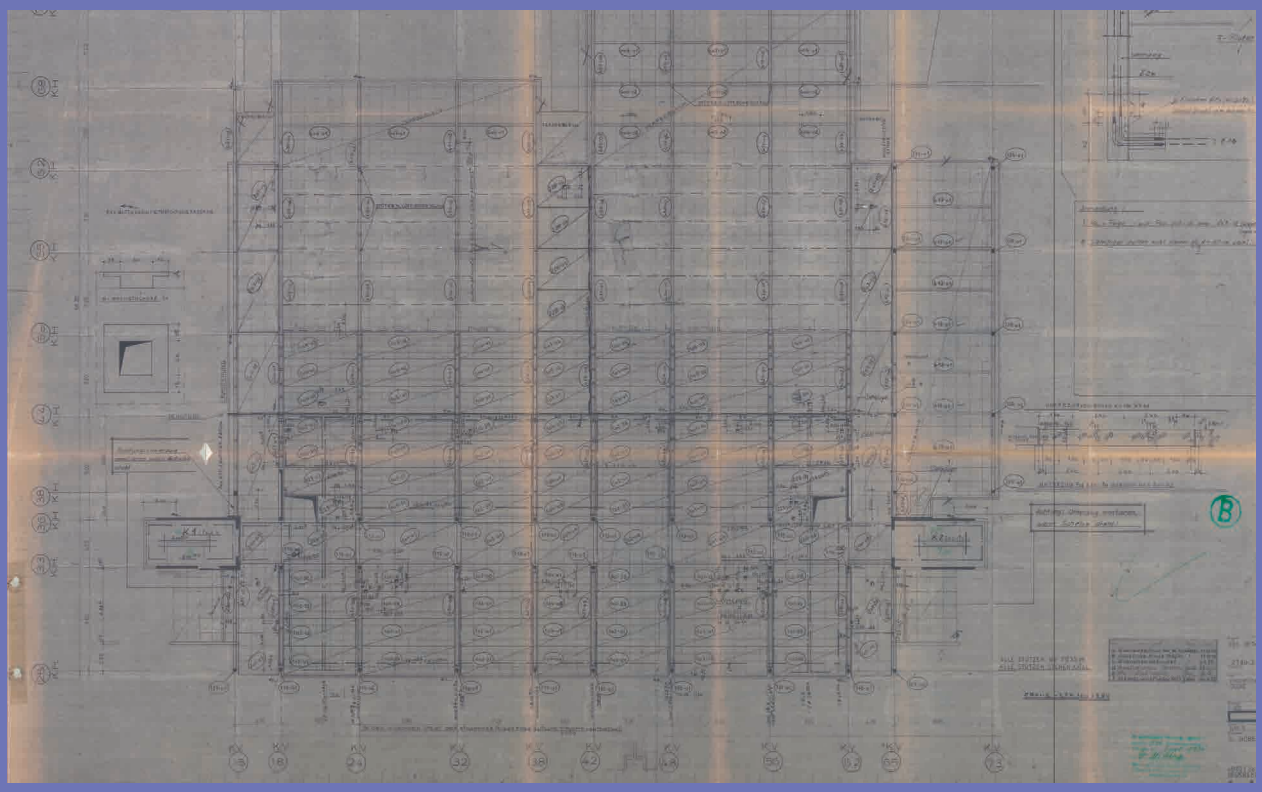


Abb. 49:
Statikplan zum
Erdgeschoss

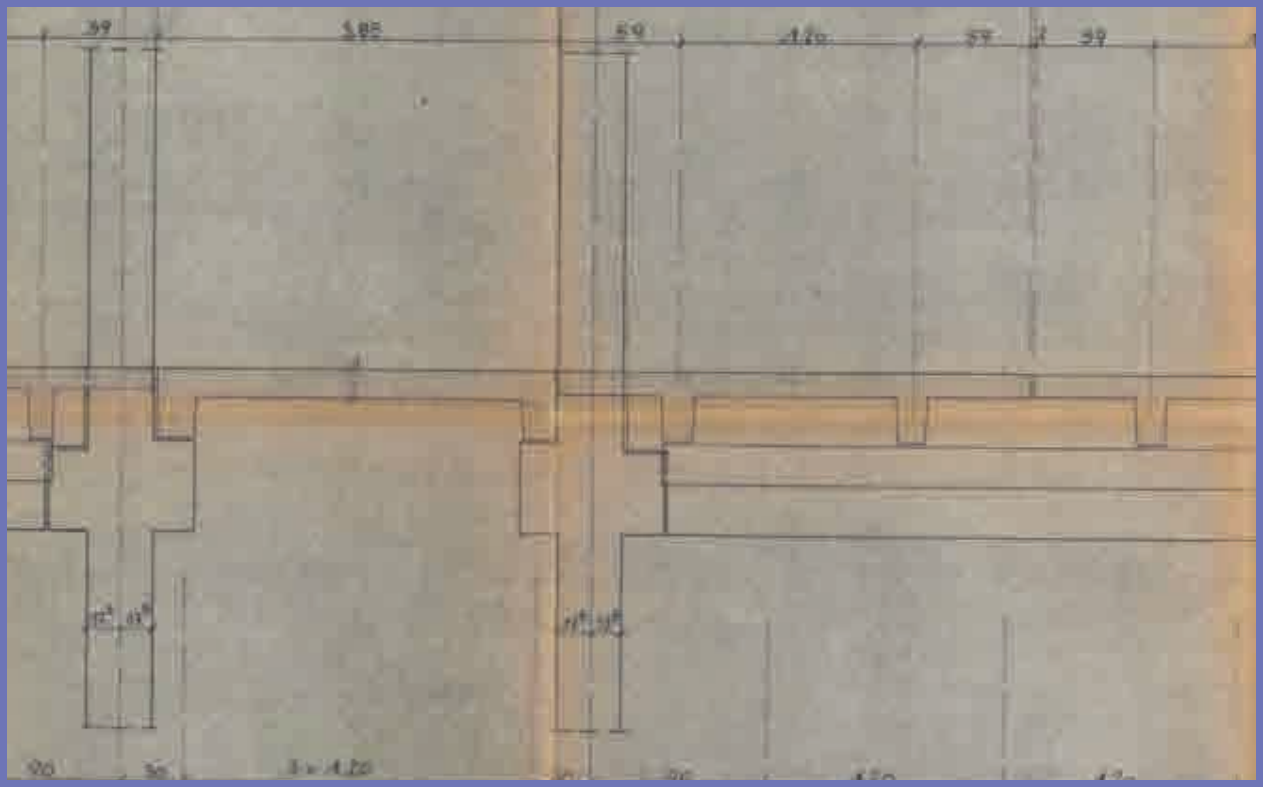


Abb. 50: Deckenanschluss der Fertigteil Stützen und Fertigteil Deckenelemente

Shed-Dach-Konstruktion zu tragen. Diese Konstruktion ist beständig und wurde bereits saniert, jedoch nur in den innenliegenden Räumen im Jahr 2022. Die aussteifenden Treppenhäuser und Giebelscheiben bestehen aus Stahlbeton-Sandwichplatten. Ebenso wirken im Erdgeschoss die Wände der WCs sowie des Lehrerzimmers als aussteifende Elemente sowie als Brandwände. Ein Teil der Tragkonstruktion ist festverbaut, was die Rückbaufähigkeit einschränkt, jedoch lassen sich einige Teile recyceln.

Das Modulraster des Gebäudes basiert auf einem Planungsraster von 1,20 × 1,20 Metern, das eine einheitliche und flexible Grundstruktur ermöglicht. Die Hauptachsen verlaufen in variablen Abständen von 9,60, 7,20, 4,80 und 3,60 Metern, wodurch unterschiedliche Raumbreiten realisiert werden können. Auffällig ist, dass das Konstruktionsraster um 30 cm gegenüber dem Planungsras-

ter versetzt ist, sodass die Stützen nicht direkt auf den Hauptachsen stehen, sondern um diesen Versatz verschoben sind. Dies hat Einfluss auf die Tragstruktur und die Gestaltung der Innenräume. Ergänzend dazu folgt auch das Ausbauraster dem Maß von 1,20 × 1,20 Metern, was eine durchgängige Systematik für Ausbau und Gestaltung schafft.

Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

Das Gebäude ist mit einer mechanischen, zentralen Belüftung mit Kühlung ausgestattet. Die Abluft wird über den Deckenhohlraum abgeführt, während Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung genutzt werden. Die Grundheizung erfolgt über Heizkörper an den Fassadenseiten. Diese sind an allen Fassadenseiten, einschließlich dem Treppenhaus, vorgesehen und machen den Eindruck für die schlechte Effizienz der Fassade nicht ausreichend für den Winterfall dimensioniert sind. Das Gebäude ist an eine Gasversorgung angeschlossen. Allerdings bestehen Probleme im Zusammenhang mit Schadstoffen, die sich negativ auf die langfristige Nutzung der technischen Ge-



Abb. 51: Blick in den ehemaligen Rohbau mit TGA Ausstattung im Obergeschoss

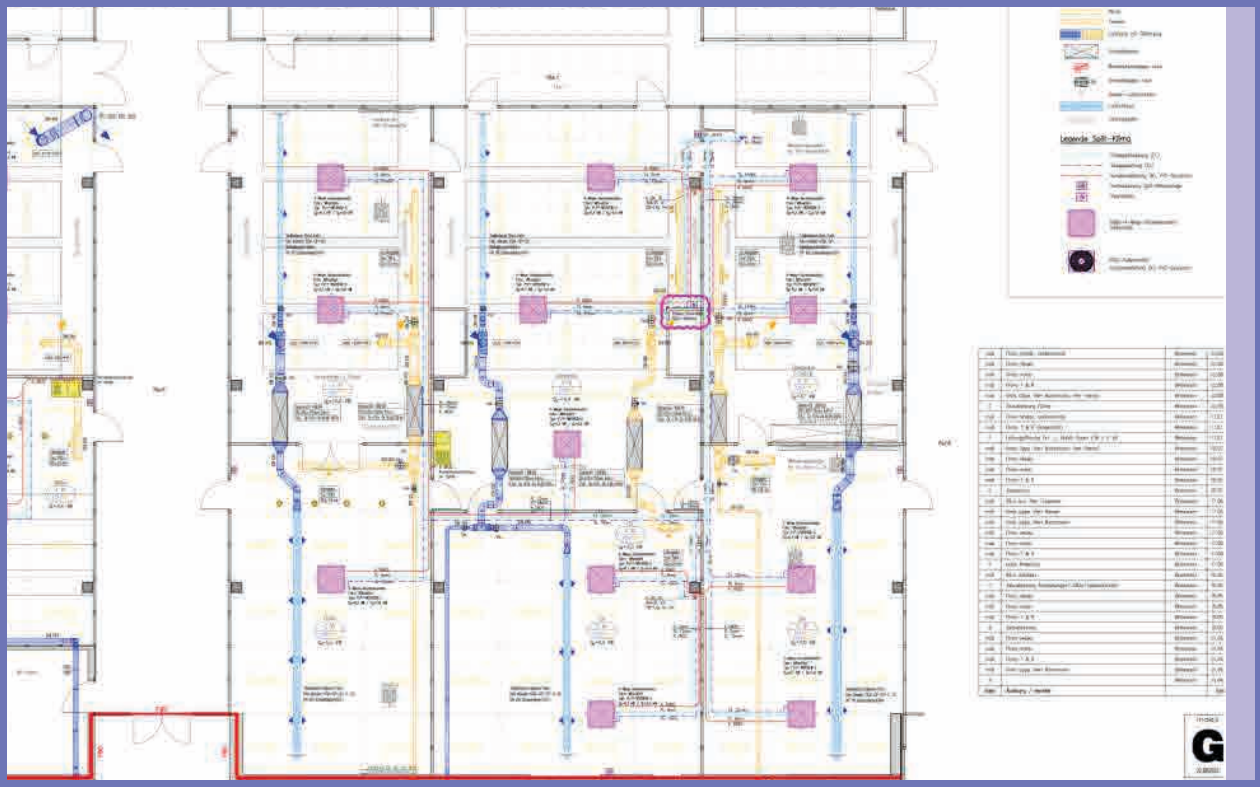


Abb. 52: Neue TGA Planung 2022

bäudeausrüstung auswirken können.

Aus diesem Grund ist im Jahre 2022 die Lüftungsanlage erneuert worden und insofern eingeschränkt worden, als das die Belüftungselemente in Form der Beleuchtung als nicht mehr funktionstüchtig (Schadstoffproblematik wurde festgestellt) angesehen wurden und nur noch bei den innenliegenden Räumen eine Lüftungsanlage vorgesehen wurde. Seitdem liegen die großen Elemente der Lüftungsanlage im Bereich des Kellers still und werden nicht mehr genutzt. Ebenso wird dadurch die sommerliche Situation verschärft. Es sind außenliegende Verschattungselemente vorgesehen, die etwa 1/3 des Fensters verdecken. Da dieser aber nicht individuell verstellbar ist und zusätzlich im Inneren nicht mit einer Kühlung gegengewirkt werden kann, heizen sich die Räume im Sommer enorm auf.

Weitere Informationen über die Effizienz der TGA sind im folgenden Abschnitt in Folge der Vorstellung des energetischen Sanierungskonzeptes von ReBuild zu entnehmen.

Innenausbau

Der Innenausbau des Felix Fechenbach Berufskollegs IV in Detmold zeichnet sich durch eine stabile und langlebige Bauweise aus, die funktionale und gestalterische Aspekte miteinander verbindet. Besonders auffällig ist das durchdachte Deckensystem, das als Montage-Bandrasterdecke mit einbrennlackierten, gelochten Aluminium-Paneelen ausgeführt wurde. Die Deckenelemente sind in Feldern von 2,40 × 2,40 Metern angeordnet und bilden ein integriertes System für Beleuchtung, Be- und Entlüftung sowie Raumakustik. Dadurch wird eine effiziente technische Versorgung der Räume ermöglicht, während gleichzeitig eine angenehme Atmosphäre geschaffen wird.

Die Wände bestehen überwiegend aus Montagetrennwänden aus Holzspanplatten, die in sämtlichen Bereichen eingesetzt wurden – mit Ausnahme der Brandwand in der Halle des Erdgeschosses. Diese Systemtrennwände sind häufig mit einem Oberlichtbereich versehen, der eine indirekte Belichtung des Flures ermöglicht und zu-



Abb. 53: Blick auf den typisch geprägten Innenausbau mit den roten Türen und den Systemtrennwänden



Abb. 54:
Blick auf die verschiednen Bodenbeläge im Gebäude

gleich eine visuelle Verbindung zwischen den Räumen schafft. In einigen Bereichen sind die Fensterflächen noch großzügiger gestaltet und zu zwei Dritteln verglast, sodass eine direkte Sichtverbindung zum Flur gegeben ist.

Hinsichtlich der Bodenbeläge wurden unterschiedliche Materialien gewählt, die sich an der jeweiligen Nutzung der Räume orientieren. In den allgemeinen Unterrichts- und Freizeitbereichen wurde Velourteppich verlegt, der eine wohnliche und gemütliche Atmosphäre unterstützt. In anderen Räumen kommt strapazierfähiger Gummi-noppenboden zum Einsatz, der eine hohe Beständigkeit und leichte Reinigung bietet. Vereinzelt wurden auch Steinzeug-Bodenfliesen verwendet, insbesondere in Räumen mit besonderem Nutzungsbedarf.

Ein weiteres wichtiges Element des Innenausbaus sind die Türen und Fenster. Neben standardmäßigen Stahltüren sind auch Brandschutztüren integriert, um die Sicherheit im Gebäude zu gewährleisten. Ein Fahrstuhl ist

vorhanden, jedoch erschließt dieser lediglich das Erdgeschoss und das Untergeschoss. Zudem befindet sich der Fahrstuhl innerhalb eines Klassenraums, was bedeutet, dass seine Nutzung entweder eine Unterrichtsstörung oder einen speziellen Schlüssel erfordert. Somit ist keine unabhängige barrierefreie Erschließung gewährleistet.

Die Farbgestaltung des Innenraums setzt gezielt Akzente. Besonders auffällig ist die Betonung der Innentüren durch die Farbe Rot, die sich als markantes Gestaltungselement durch das gesamte Gebäude zieht. Rot wird ebenso für die Treppengeländer in den Treppenhäusern sowie für Geschosse und andere Bauelemente wie Schränke verwendet. Im Kontrast dazu sind die Systemtrennwände in einem neutralen Grau gehalten. Weitere Farbakzente setzen die braunen Anstriche von Säulen, Fenstern und Heizkörpern, die sich harmonisch an die braunen Fassadenelemente anpassen und das Farbkonzept abrunden.

Die Möblierung des Gebäudes besteht aus klassischen



Abb. 55: Blick durch eine Feuerschutztür in einen Flur hinein



Abb. 56:
Blick auf die Innenraum-ausstattung in Form von Tischen und Stühlen

Schulmöbeln wie Schränken, Stühlen und Tischen, die jedoch nicht speziell auf das Farbkonzept abgestimmt wurden. In den Klassenräumen sind zudem traditionelle Schultafeln, moderne Whiteboards sowie Beameranlagen vorhanden. Ein besonderes funktionales Element des Innenausbaus stellt die Großküche der Mensa dar, die eine wichtige Rolle im Schulalltag übernimmt.

Insgesamt zeigt sich der Innenausbau als eine durchdachte Kombination aus Funktionalität, Langlebigkeit und gezielter Farbgestaltung. Trotz einzelner Einschränkungen, wie der problematischen Platzierung des Fahrstuhls, bietet die Innenraumgestaltung eine klare Struktur und unterstützt die Nutzung des Gebäudes als modernes Berufskolleg.

Außenbereich

Der Außenbereich des Gebäudes IV des Felix Fechenbach Berufskollegs ist geprägt von einer weitläufigen Pflasterung, die das Hauptgestaltungselement darstellt. Ein Wechsel mit Grünflächen findet kaum statt, wodurch

eine eher monotone Gestaltung entsteht. Um dennoch eine gewisse visuelle Abwechslung zu schaffen, wurden unterschiedliche Arten von Pflastersteinen verwendet. Diese Variation lockert das Gesamtbild auf, ersetzt jedoch nicht die fehlenden natürlichen Elemente.

Ein markantes Merkmal des Außenbereichs sind die zahlreichen Höhenunterschiede, die vor allem durch Treppen überwunden werden. Einige dieser Treppen sind nicht nur funktionale Verbindungselemente, sondern bewusst als Sitzstufen gestaltet, die zum Verweilen einladen. Darüber hinaus wurden verschiedene Freizeitmöglichkeiten integriert, wie ein mit Pflastersteinen angelegtes Schachfeld und fest installierte Tischtennisplatten. Bänke sind ebenfalls vorhanden und bieten weitere Sitzgelegenheiten. Ein kleiner überdachter Bereich am südlichen Eingang des Gebäudes dient als geschützter Übergang zwischen Innen- und Außenraum.

Die Wegeführung und Gestaltung des Außenbereichs ist stark verwinkelt, was das ursprüngliche Ziel verfolgt, ver-



Abb. 57: Der Außenraum mit den verschiendenen Ebenen und dem hohen Versieglungsgrad



Abb. 58: Der Impressionen aus dem Außenraum: Unterstände und diverse Sitzmöglichkeiten

schiedene Aufenthaltsnischen zu schaffen. Diese sollen insbesondere durch runde, organische Formen Sitz- und Gesprächskreise ermöglichen. Allerdings führt die verwinkelte Anordnung auch zu einer gewissen Unübersichtlichkeit. Einerseits erschließt sich nicht intuitiv, welche Bereiche welche spezifische Nutzung bieten, da die Aufenthaltsqualität überall ähnlich ist. Andererseits entsteht eine Orientierungslosigkeit, insbesondere wenn es darum geht, sich zwischen den Gebäudeteilen I bis III und dem hinteren Bereich von Gebäude IV zurechtzufinden. Die Gestaltung erinnert stellenweise an ein Labyrinth, in dem nicht immer klar ist, welche Wege tatsächlich zur Erschließung vorgesehen sind oder ob bestimmte Bereiche überhaupt betreten werden dürfen.

Ein weiteres zentrales Element des Außenbereichs sind die brückenartigen Erschließungswege, die mit Stahlgitterelementen ausgestattet sind. Sie dienen dazu, die Höhenunterschiede im Bereich des Parkplatzes zu überwinden und leiten Besucher sowie Schüler über angeschlossene Treppen zu den jeweiligen Gebäudeteilen.

Während diese Konstruktionen funktional sind, tragen sie ebenfalls zur eher technischen und wenig naturnahen Gestaltung des Außenbereichs bei.

Insgesamt zeigt sich der Außenbereich als funktional angelegt, jedoch mit gestalterischen Schwächen in Bezug auf Orientierung und Aufenthaltsqualität. Die Verwinkelung und die vielen Höhenunterschiede erschweren eine intuitive Nutzung, während das Fehlen von Grünflächen die Atmosphäre eher kühl und wenig einladend wirken lässt.

4.3.2 Schadstoffgutachten Firma Jockel 2022

Im Rahmen der Schadstoffuntersuchungen der Firma Jockel wurden im Jahre 2022 verschiedene Bauteile des Gebäudes auf Schadstoffe analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mehrere Materialien mit gesundheitsgefährdenden Stoffen belastet sind, wodurch eine Wiederverwendung in den meisten Fällen ausgeschlossen ist. Die Feststellung der Schadstoffbelastung erfolgte durch eine systematische Untersuchung, bei der Proben entnommen und in einem Labor analysiert wurden. Hierbei kamen Methoden wie Materialprobenanalysen, Luftmessungen und Bauteilöffnungen zum Einsatz, um Schadstoffe zu identifizieren, deren Gefährdungspotenzial zu bewerten und entsprechende Maßnahmen für den Rückbau sowie die Entsorgung festzulegen.

Die Untersuchung ergab, dass die Abhangdecken und Systemwänden des Gebäudes künstliche Mineralfasern (KMF) enthalten, die lungengängige Fasern freisetzen können. Diese Materialien gelten als gesundheitsgefährdend und müssen unter besonderen Schutzmaßnahmen entfernt werden. Der Ausbau sollte durch Fachpersonal erfolgen, wobei eine staubarme Demontage sowie eine Verpackung in zugelassene Big Bags vorgeschrieben sind. Anschließend muss die Entsorgung gemäß den geltenden Abfallrichtlinien erfolgen.



Abb. 59: Blick in einen Klassenraum mit geöffneter Decke

Auch das Sheddach weist eine Schadstoffbelastung auf, da die verbauten Zementplatten Asbest enthalten. Asbesthaltige Materialien können gefährliche Fasern freisetzen, die schwere Atemwegserkrankungen verursachen. Um eine Gefährdung zu vermeiden, dürfen diese Platten nur von zertifizierten Fachfirmen gemäß der TRGS 519 (Technische Regeln für Gefahrstoffe) ausgebaut werden. Dabei muss eine mechanische Bearbeitung vermieden werden, um die Faserfreisetzung zu minimieren. Die Asbestzementplatten sind luftdicht zu verpacken und in zugelassenen Deponien zu entsorgen.

In einem Schadstoffgutachten sind stichprobenartig verschiedene Fußbodenbereiche auf Asbest untersucht worden. In diesen Stichproben konnte kein Asbest nachgewiesen werden. Allerdings sind bei derartigen Bodenbelägen, insbesondere unter Teppichböden und Gumminoppenböden, eine potenzielle Belastung durch asbesthaltige oder PAK-haltige (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) Kleber zu erwarten und ggf. noch in einem Rückbauprozess nachweisbar. Bevor eine

Entfernung erfolgt, ist eine genaue Probenanalyse notwendig. Da mechanische Abtragungsmethoden eine Schadstofffreisetzung begünstigen könnten, sollte auf staubarme Verfahren zurückgegriffen werden. Die kontaminierten Materialien sind fachgerecht zu entsorgen.

Auch in den Beleuchtungselementen des Gebäudes wurden Schadstoffe festgestellt. Die verbauten Leuchtstoffröhren enthalten Quecksilber, das eine vorsichtige Demontage ohne Bruch der Röhren erforderlich macht. Diese müssen in speziellen Behältern für Sondermüll gesammelt und über zertifizierte Recyclingbetriebe entsorgt werden.

Zusätzlich sind die Betonstützen mit einer gesundheitsgefährdenden Beschichtung versehen. Diese Farben können giftige Partikel freisetzen, die über die Atemwege oder die Haut aufgenommen werden können. Vor dem Entfernen der Beschichtung muss daher eine genaue Analyse erfolgen. Abrasive Verfahren wie Sandstrahlen oder Schleifen sind ohne geeigneten Arbeitsschutz zu



Abb. 60:
Teststellen der Schadstoff-Untersuchung im Bereich des Fußboden-Belags

vermeiden. Die abgeschliffenen Farbpartikel gelten als Sondermüll und müssen entsprechend entsorgt werden.

Ein weiterer kritischer Schadstofffund wurde im Bereich der Lüftungsanlage und der Brandschutzklappen festgestellt. Die verbauten Lüftungskanäle im Bereich der Anschlagsdichtungen weisen Asbestmaterialien auf, die durch Luftbewegungen freigesetzt werden könnten. Asbestfasern in Lüftungsanlagen stellen ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar, da sie sich im gesamten Gebäude verteilen können. Um eine Exposition zu vermeiden, muss der Rückbau durch spezialisierte Fachkräfte erfolgen. Dabei ist sicherzustellen, dass die Kanäle vor der Demontage abgedichtet werden, um eine Faserfreisetzung zu verhindern. Die Entfernung muss unter Einhaltung der strengen Sicherheitsvorschriften für Asbest erfolgen, und die betroffenen Bauteile sind luftdicht verpackt einer gesonderten Entsorgung zuzuführen.

Das Schadstoffgutachten zeigt, dass verschiedene Bauteile des Gebäudes mit gesundheitsgefährdenden Stoffen belastet sind und entsprechend nicht in der weiteren Planung berücksichtigt werden. Zu diesen gehören:

- PAK oder asbesthaltiger Kleber unter Teppichböden oder Parkett;
- Sheddächer mit Asbest-haltigen Zementplatten
- KMF-haltige Rasterdecken bzw. Systemwänden und Dämmungen
- Quecksilber in Leuchtstoffröhren;

Der Umgang mit diesen Materialien erfordert final und ausschließlich spezielle Schutzmaßnahmen, eine fachgerechte Entsorgung und in vielen Fällen den Rückbau durch spezialisierte Fachbetriebe. Durch eine sorgfältige Planung und die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben kann eine sichere Demontage und Entsorgung gewährleistet werden.

4.3.3 Machbarkeitsstudie Concular 2023

Die Machbarkeitsstudie von Concular am Felix-Fechenbach-Berufskolleg in Detmold verfolgt das Ziel, die Potenziale für einen ressourcenschonenden Rückbau und die Wiederverwendung von Bauteilen im Sinne der zirkulären Bauwirtschaft umfassend zu analysieren. Im Zentrum steht dabei die Frage, welche Materialien und Bauteile aus dem Bestandsgebäude nach dem Prinzip „Urban Mining“ zurückgewonnen und sinnvoll weiterverwendet oder stofflich verwertet werden können, um sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile zu erzielen.

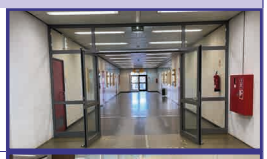
KATEGORIE	ANZAHL BAUTEILE	MASSE [T]	ANTEIL AN GESAMTZAHL [%]	ANTEIL AN GESAMTMASSE [%]	BEURTEILUNGSKRITERIEN
Reuse (Wiederverwendung)	1.091	281,5	49,5 %	54,1 %	- Guter bis sehr guter Zustand - Leicht demontierbar (verschraubt, gesteckt) - Schadstofffrei - Normgerechte Maße - Technisch funktionsfähig - Marktgängigkeit vorhanden
Recycle (Stoffliche Verwertung)	589	144,3	26,7 %	27,7 %	- Kein Wiederverwendungspotenzial - Materialien sortenrein trennbar - Technisch überholt oder beschädigt - Gut recycelbare Materialien (Metall, Glas, Beton)
Dispose (Entsorgung)	524	94,2	23,8 %	18,1 %	- Schadstoffbelastung (z. B. Asbest, HBCD) - Verbundstoffe nicht trennbar - Starker Verschleiß oder Beschädigung - Keine technische oder wirtschaftliche Verwertbarkeit

Tab. 8: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular

Im Rahmen der Untersuchung wurden insgesamt 2.204 Bauteile mit einem Gesamtgewicht von etwa 520 Tonnen identifiziert, die potenziell für eine Wiederverwendung oder stoffliche Verwertung infrage kommen. Die Bestandsaufnahme erfolgte mittels einer detaillierten Vor-Ort-Begehung, ergänzt durch eine digitale Erfassung und Modellierung des Gebäudes. Anschließend wurden die einzelnen Bauteile systematisch nach ihrem Zustand, ihrer Rückbaufähigkeit, Schadstofffreiheit, technischen Normkonformität und ihrem Verwertungspotenzial bewertet. Die daraus resultierende Einteilung erfolgt in drei Hauptkategorien: Reuse (Wiederverwendung), Recycle (stoffliche Verwertung) und Dispose (Entsorgung).

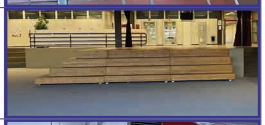
In die Kategorie Reuse wurden all jene Bauteile aufgenommen, die sich durch einen guten bis sehr guten Zustand auszeichnen, leicht rückbaubar und funktional sind sowie den aktuellen technischen Anforderungen entsprechen. Voraussetzung war außerdem eine möglichst sortenreine Bauweise, die eine einfache Demontage ohne Beschädigung ermöglicht. Zu den wiederverwendbaren Bauteilen zählen beispielsweise 274 Aluminiumfenster, die mit etwa 85 Tonnen einen erheblichen Anteil am Materialvolumen ausmachen. Diese Fenster zeichnen sich durch ihre modulare Konstruktion, ihre unbeschädigten Rahmen und Verglasungen sowie durch eine hohe Nachfrage am Sekundärmarkt aus. Auch 390 Innentüren mit Zargen, mit einem Gesamtgewicht von rund 48 Tonnen, wurden als wiederverwendbar eingestuft. Die Türen weisen standardisierte Maße auf, befinden sich größtenteils in einem einwandfreien Zustand und wurden nicht verklebt, sondern verschraubt montiert – eine wichtige Voraussetzung für die Demontage ohne Substanzverlust. Weitere wiederverwendbare Elemente sind Sanitärobjekte wie Waschbecken, Urinale und Toiletten, sofern diese unbeschädigt und funktional sind. Ebenso wurden modulare Beleuchtungselemente, Schalterprogramme und Heizkörper teilweise als wiederverwendbar eingestuft, insbesondere wenn sie aktuellen Sicherheitsstandards entsprechen.

Die Kategorie Recycle umfasst Bauteile, die nicht mehr

BAUTEIL/GEGENSTAND	ANZAHL	BEGRÜNDUNG DER EINORDNUNG	BEISPIEL FOTO
REUSE			
Brandschutztüren	3.0	Technisch wiederverwendbar	
Innentüren (rot)	202.0	Wiederverwendung möglich, je nach Zustand	
Geländer	8.0	Wiederverwendbar durch einfache Demontage	
Holzpodest	1.0	Holz kann bei guter Qualität wiederverwendet werden	
Großküche	1.0	Technische Ausstattung zur Weiternutzung geeignet	
Lüftungsgeräte	20.0	Wiederverwendbar bei funktionsfähigem Zustand	
Pflastersteine	7040.0	Wiederverlegbar bei intakter Oberfläche	
Überdachung	1.0	Wiederverwendbar, abhängig vom Zustand	
Möblierung	3.022	Allgemein gut wiederverwendbar	

Tab. 9: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular

direkt wiederverwendet werden können – etwa aufgrund von Alter, Beschädigungen oder technischen Veränderungen – deren Materialien jedoch sortenrein genug sind, um stofflich verwertet zu werden. Hierzu zählen insbesondere metallische Bauteile wie Rohrleitungen, Heizkörper oder Armaturen, die einen hohen Anteil an recycelbarem Kupfer, Stahl oder Aluminium enthalten. Auch Bodenbeläge wie PVC, Linoleum oder Teppich, die sich zwar nicht erneut verlegen lassen, können – je nach Reinheit – thermisch verwertet oder einem Downcycling-Prozess zugeführt werden. Glaselemente, bei denen die Rahmen oder Dichtungen beschädigt sind, lassen sich oft nicht als Ganzes erhalten, das Glas selbst kann jedoch

BAUTEIL/GEGENSTAND	ANZAHL	BEGRÜNDUNG DER EINORDNUNG	BEISPIEL FOTO
		RECYCLE	
Außentüren	12.0	Metallanteile erlauben Recycling	
Fenster	279.0	Glas und Aluminiumanteile können recycelt werden	
Bodenfliesen	298.0	Bei Entfernung ohne Bruch recycelbar	
Sanitärkeramik	96.0	Recycling als Bauschutt möglich	
Lüftungsanlagen	20.0	Metallisch, daher recycelbar	
Personenaufzug	1.0	Komponenten teilweise recycelbar	
Aluminium & Stahl (Fassade, Dach)	-	Sehr gut recycelbare Materialien	
Stahlbeton (Konstruktion)	-	Recycling als Füllmaterial oder Bruchstein möglich	

Tab. 10: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular

in der industriellen Glasverwertung genutzt werden. Auch Betonteile, die aus nicht erhaltbaren Bereichen des Gebäudes stammen, können nach der Zerkleinerung als Recycling-Baustoff (etwa im Straßenbau) weiterverwendet werden. Die Recyclingquote der untersuchten Bauteile liegt damit bei 26,7 %.

Die Kategorie Dispose schließlich umfasst jene Bauteile, die aus ökologischen, technischen oder gesundheitlichen Gründen nicht weiterverwertet werden können. Typische Beispiele sind asbesthaltige Materialien, wie sie sich häufig in alten Dichtungen oder Bodenbelägen finden, sowie Dämmstoffe aus Polystyrol oder alter Mineralwolle, die mit Flammschutzmitteln belastet sind. Auch Verbundmaterialien, etwa aus Holz und Kunststoff, die nicht oder nur mit hohem technischen Aufwand trennbar sind, müssen in den meisten Fällen entsorgt werden. Veraltete Elektroinstallationen, die nicht mehr den gel-

BAUTEIL/GEGENSTAND	MASSE (KG)	BEGRÜNDUNG DER EINORDNUNG	BEISPIEL FOTO
		DISPOSE	
Gumminoppenboden	8714.0	Verklebung erschwert Reuse oder Recycling	
Veloursteppichboden	3618.0	Verklebung und Hygieneproblem	
Fassadendämmung	-	Meist verklebt, evtl. schadstoffbelastet	
Bandrasterdecke	10108.0	KMF-Belastung	
Systemtrennwände	1556.0	Schadstoffverdacht, schlechte Qualität	

Tab. 11: Mengen Zusammenstellung gemäß Concular

tenden Normen entsprechen oder Schadstoffe wie PCB enthalten, fallen ebenfalls unter diese Kategorie. Der Anteil der zu entsorgenden Materialien beträgt laut Studie rund 23,8 % des Bestands.

Ein zentraler Bestandteil der Untersuchung war auch die Bewertung der Betonstruktur des Gebäudes. Diese besteht aus einem gut erhaltenen Stahlbetonskelett mit massiven Unterzügen, Stützen und Deckenplatten. Die Analyse zeigt, dass die tragende Struktur in einem sehr guten Zustand ist und sich grundsätzlich für den Erhalt und die Integration in eine neue Gebäudenutzung eignet. Der Erhalt dieser Struktur bietet erhebliche ökologische Vorteile: Laut Berechnungen der Studie ließen sich durch die Vermeidung von Abriss und Neubau der Betonmasse mehr als 1.400 Tonnen CO_2 einsparen – allein durch den Wegfall der energieintensiven Zementproduktion. Gleichzeitig würden auch erhebliche Kosten für Rückbau, Entsorgung und Neubau eingespart, was den Erhalt aus wirtschaftlicher Sicht zusätzlich attraktiv macht.

In der Gesamtbetrachtung ergibt sich ein positiver Aus-

blick: Knapp die Hälfte aller untersuchten Bauteile ist für die direkte Wiederverwendung geeignet. Bei frühzeitiger Integration in den Planungsprozess und durch Nutzung bestehender Rückbau- und Vermarktungsnetzwerke kann die Rückgewinnung dieser Ressourcen nicht nur zur Reduktion von CO_2-Emissionen und Abfallaufkommen beitragen, sondern auch ökonomisch sinnvoll umgesetzt werden. Die Studie empfiehlt daher, den Rückbau als integralen Bestandteil der Projektplanung zu behandeln, Materialpässe und Bauteilkataloge digital zu erfassen, regionale Wiederverwendungsnetzwerke zu nutzen und zirkuläre Kriterien bereits in die Ausschreibungen und Leistungsbeschreibungen einzubinden.

Der Erhalt der Betonstruktur in Kombination mit einem systematischen Rückbau und der Wiederverwendung von mehr als 2.000 Bauteilen stellt ein vorbildliches Modell für nachhaltiges, zirkuläres Bauen dar – insbesondere im öffentlichen Bildungsbau. Die Machbarkeitsstudie empfiehlt deshalb, das Projekt als Pilotvorhaben weiterzuführen und als Best-Practice-Beispiel für zukünftige Bauvorhaben auf kommunaler und Landesebene zu dokumentieren.

4.3.4 Energetisches Sanierungskonzept ReBuild 2023

Das Berufskolleg wurde im Jahr 1976 errichtet und umfasst insgesamt fünf Geschosse. Ein Umbau oder Anbau wurde bisher nicht durchgeführt. Die Bruttogrundfläche (BGF) des Gebäudes beträgt 12.928 m², während die beheizte Nettogrundfläche (NGF) 12.422 m² umfasst. Die thermische Hüllfläche beläuft sich auf 17.493 m², und das beheizte Gebäudevolumen beträgt 46.586 m³. Das Verhältnis von Hüllfläche zu Volumen liegt bei 0,38 1/m.

Ist-Zustand des Gebäudes

Das Felix-Fechenbach-Berufskolleg weist in seinem derzeitigen baulichen Zustand erhebliche energetische Mängel auf. Besonders deutlich werden diese bei der Be-

trachtung der Gebäudehülle, deren thermische Qualität nicht den heutigen Standards genügt. Die verwendeten Baumaterialien und Konstruktionen stammen überwiegend noch aus dem Errichtungsjahr 1976 und wurden seitdem kaum modernisiert. Dies führt zu hohen Transmissionswärmeverlusten und einem ineffizienten Energieeinsatz.

Gebäudehülle

Die Gebäudehülle besteht im Wesentlichen aus massiven Beton-Außenwänden, einem Flachdach und großflächigen Fensterfronten. Die Außenwände sind als 25 cm starke Stahlbeton-Skelettkonstruktion mit vorgesetzten Betonsandwichplatten ausgeführt. Zwischen diesen Platten befindet sich lediglich eine rund 5 cm dicke Dämmschicht aus expandiertem Polystyrol (EPS), was aus heutiger Sicht unzureichend ist. Diese geringe Dämmwirkung begünstigt Wärmeverluste erheblich.

Auch das Dach trägt zur unzureichenden thermischen Qualität bei. Das Flachdach des Erdgeschosses verfügt über eine 6 cm starke Wärmedämmung sowie eine zusätzliche Gefälledämmung von 12 cm. Im Bereich des dritten Obergeschosses wurde die ursprüngliche Dämmung im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme um 5 cm verstärkt. Trotz dieser Maßnahme liegt die Dämmleistung jedoch auch hier deutlich unter den heutigen Anforderungen an eine energieeffiziente Gebäudehülle.

Die Fenster und Außentüren stammen größtenteils noch aus dem ursprünglichen Baujahr. Lediglich einzelne Fensterflächen im Bereich der Sheddächer der Mensa wurden im Laufe der Jahre ersetzt, allerdings ohne signifikante Verbesserung der energetischen Eigenschaften. Die Mehrzahl der Fenster ist einfach oder unzureichend verglast, was in Kombination mit dem hohen Anteil an transparenten Flächen zu besonders hohen Wärmeverlusten führt. Obwohl Fenster, Dachfenster und Türen nur etwa 13 % der gesamten Hüllfläche ausmachen, verursachen sie rund 48 % der Transmissionswärmeverluste – ein klarer Hinweis auf ihre energetische Schwäche.

Die Bodenplatte bildet den unteren Abschluss der thermischen Hülle und zeigt ebenfalls erhebliche Defizite. In den nicht unterkellerten Bereichen liegt sie direkt über

dem Erdreich und ist kaum oder gar nicht gedämmt. In den unterkellerten Zonen bildet der Kellerfußboden den thermischen Abschluss. Zwar sind die Wärmeverluste über das Erdreich tendenziell geringer als bei Bauteilen, die direkt an Außenluft grenzen, doch auch hier besteht energetisch gesehen dringender Sanierungsbedarf.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass – mit Ausnahme des teilweise modernisierten Flachdachs – sämtliche opaken Bauteile (Außenwand, Bodenplatte, Fenster, Türen) sich noch im ursprünglichen Bauzustand befinden und damit einen schlechten energetischen Gesamtzustand aufweisen. Die thermische Hülle bietet somit ein erhebliches Potenzial für eine energetische Sanierung.

Anlagentechnik

Das Gebäude wird derzeit über einen Fernwärmeanschluss der Stadtwerke Detmold mit Heizwärme versorgt. Der eingesetzte Energieträger zeichnet sich durch einen günstigen Primärenergiefaktor von 0,22 aus und verursacht keine direkten CO_2-Emissionen. Der Anteil erneuerbarer Energien im Fernwärmemix liegt bei beacht-

BAUTEIL	FLÄCHE [M²]	U-WERT IST-ZUSTAND [W/M²K]	GEG [W/M²K]	BEG [W/M²K]	PASSIVHAUS- [W/M²K]
Außenwand 25 cm	3.531	0,8	0,24	0,20	0,15
Außenwand 8 cm	227	5,0	0,24	0,20	0,15
Bodenplatte	6.039	1,2	0,30	0,25	0,15
Dach EG	4.174	0,23	0,24	0,14	0,15
Dach 3. OG	1.374	0,30	0,24	0,14	0,15
Glasdächer	497	5,0	2,00	1,60	0,80
Fenster	1.526	3,0	1,30	0,95	0,80
Türen	125	3,0	1,80	1,30	0,80

Tab. 12: Ermittelte U-Werte aus dem Sanierungs-Konzept

lichen 77,4 %, was aus klimapolitischer Sicht vorteilhaft ist.

Die Wärmeverteilung innerhalb des Gebäudes erfolgt über Radiatoren sowie über eine Raumlufttechnikanlage (RLT), die gleichzeitig für Belüftung und Beheizung der innenliegenden Räume sorgt. Die Heizungsverrohrung ist im Heizungsraum grundsätzlich gut gedämmt, jedoch bestehen im Bereich von Armaturen und Pumpen noch erhebliche Lücken in der Dämmung. Zudem sind die vorhandenen Umwälzpumpen veraltet und entsprechen nicht dem heutigen Stand der Technik. Der Austausch gegen hocheffiziente Pumpen würde den Stromverbrauch dieser Anlagen um bis zu 80 % reduzieren und sich durch die eingesparten Betriebskosten innerhalb weniger Jahre amortisieren. Eine solche Maßnahme zählt daher zu den wirtschaftlichsten Schritten innerhalb einer Sanierungsstrategie.

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt dezentral über elektrische Durchlauferhitzer, was in Hinblick auf die Energieeffizienz suboptimal ist. Auch die Beleuchtung des Gebäudes ist größtenteils veraltet – sie basiert auf T8-Leuchtstoffröhren, die einen vergleichsweise hohen Stromverbrauch aufweisen. Eine Umrüstung auf LED-Technik würde hier langfristig sowohl energetisch als auch wirtschaftlich Vorteile bringen.

Die vorhandene Lüftungstechnik versorgt ausschließlich die innenliegenden Räume über eine Zu- und Abluftanlage. Eine Wärmerückgewinnung ist derzeit nicht Bestandteil des Systems, wodurch ein weiteres Optimierungspotenzial besteht.

Regenerative Energien werden – abgesehen vom indirekten Einsatz über die Fernwärme – derzeit nicht genutzt. Die Integration von Photovoltaik- oder Solarthermieanlagen wäre eine sinnvolle Ergänzung zur Erhöhung der Eigenversorgung und zur weiteren Reduktion der CO_2-Bilanz.

Identifizierte Schwachstellen im Überblick:

- Sheddächer: Die einfach verglasten Dachflächen über der Mensa verursachen im Winter erhebliche Wärme-

verluste und führen im Sommer aufgrund fehlenden Sonnenschutzes zu starker Überhitzung der Innenräume.
- Fenster und Türen: Der bauliche und energetische Zustand dieser Bauteile ist unzureichend. Besonders der große Anteil an Fensterflächen wirkt sich negativ auf die Energiebilanz aus.
- Heizungsumwälzpumpen und Verteilnetz: Die fehlende Dämmung sowie der Einsatz veralteter Pumpentechnik führen zu unnötig hohen Energieverlusten und Stromverbräuchen.

Insgesamt zeigt sich, dass sowohl bei der Gebäudehülle als auch bei der technischen Gebäudeausrüstung erhebliche energetische Defizite bestehen. Diese bieten jedoch gleichzeitig ein großes Potenzial für Verbesserungen im Rahmen eines umfassenden energetischen Sanierungskonzeptes.

Sanierungsempfehlungen im Überblick

Die Untersuchung verschiedener energetischer Sanierungsmaßnahmen für das Felix-Fechenbach-Berufskolleg zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Investitionskosten, der Amortisationszeiten sowie der erzielten Energie- und CO_2-Einsparungen.

Eine grundlegende Sanierung, bestehend aus der Dämmung der Außenwände sowie dem Austausch von Fenstern und Türen, verursacht Investitionskosten von 2,509 Mio. € und amortisiert sich innerhalb von 30 Jahren. Sie reduziert den Endenergiebedarf um 779.000 kWh jährlich, was einer Einsparung von 36 % an CO_2-Emissionen entspricht.

Durch die Ergänzung der Dachsanierung steigen die Kosten auf 4,173 Mio. €, während die Amortisationszeit auf über 40 Jahre ansteigt. Eine Erweiterung um die Dämmung der Bodenplatte erhöht die Investitionskosten auf 5,713 Mio. €, ermöglicht jedoch die Einstufung als „Effizienzgebäude 70“ mit einer Primärenergieeinsparung von 1.106.000 kWh und 46 % weniger CO_2-Ausstoß.

Die Kombination mit einer Photovoltaikanlage (PV) führt zu weiteren Energieeinsparungen. Beispielsweise erzielt die Sanierung der Außenwand und Fenster in Verbin-

GESAMT-MASS-NAHMEN	INVESTI-TION(€)	AMORTI-SATION (JAHRE)	EFFI-ZIENZ-HAUS-STUFE	EINSPA-RUNG ENDE-NERGIE (KWH/A)	EINSPA-RUNG PRIMÄR-ENERGIE (KWH/A)	CO_2-EINSPA-RUNG (KG/A)
Außen-wand + Fenster/ Türen	2.509.000	30	-	779.000	865.000	208. 000 (36%)
Außen-wand + Fenster/ Türen + Dach	4.173.000	>40	-	824.000	916.000	220.000 (38%)
Außen-wand + Fenster/ Türen + Dach + Bo-denplatte	5.713.000	>40	Effizienz-gebäude 70	995.000	1.106.000	266. 000 (46%)
Außen-wand + Fenster/ Türen + PV	2.763.000	24	-	958.000	1.187.000	292.000 (50%)
Außen-wand + Fenster/ Türen + Dach + PV	4.427.000	37	-	1.003.000	1.238.000	304.000 (52%)
Außen-wand + Fenster/ Türen + Dach + Bo-denplatte + PV	5.967.000	>40,0	Effizienz-gebäude 40	1.174.000	1.428.000	350.000 (60%)

Tab. 13: Investitions-übersicht aus dem Sanierungskonzept

dung mit einer PV-Anlage eine Einsparung von 958.000 kWh Endenergie jährlich (50 % weniger CO_2-Emissionen) bei vergleichsweise niedrigen Investitionskosten von 2,763 Mio. € und einer Amortisationszeit von nur 24 Jahren.

Die umfassendste Maßnahme, bestehend aus der Dämmung der Außenwand, des Dachs und der Bodenplatte in Kombination mit einer Photovoltaikanlage, hat mit 5,967 Mio. € die höchsten Investitionskosten. Sie ermöglicht jedoch die Klassifizierung als „Effizienzgebäude 40“ und reduziert den Primärenergieverbrauch um 1.428.000 kWh jährlich, was eine CO_2-Einsparung von 60 % bedeu-

tet.

Vorteile und Nachteile der Maßnahmen

Vorteile:

- Erhöhung der Energieeffizienz: Alle Maßnahmen reduzieren den Endenergiebedarf und die CO_2-Emissionen erheblich.
- Langfristige Kostenersparnis: Insbesondere die Kombination aus Dämmung und Photovoltaik zeigt positive Auswirkungen auf die Betriebskosten.
- Verbesserung des Raumklimas: Eine umfassende Dämmung sorgt für eine angenehmere Innenraumtemperatur im Sommer wie im Winter.
- Erreichen von Effizienzhaus-Standards: Die Maßnahmenpakete 3 und 6 ermöglichen eine Zertifizierung als Effizienzgebäude.

Nachteile:

- Hohe Investitionskosten: Maßnahmen mit einer vollständigen Sanierung und Photovoltaik überschreiten 5 Mio. € und haben lange Amortisationszeiten.
- Langwierige Umsetzung: Maßnahmen wie die Dämmung der Bodenplatte sind sehr aufwendig und erfordern eine Kernsanierung.
- Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen: Einzelmaßnahmen haben teils sehr lange Amortisationszeiten, insbesondere ohne PV-Anlage.

Empfehlung für das Felix-Fechenbach-Berufskolleg

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten, der Einsparpotenziale und der Machbarkeit wird empfohlen, eine schrittweise Sanierung in mehreren Phasen durchzuführen:

1. Phase: Austausch der Fenster, Türen und Glasdächer sowie die Dämmung der Außenwand. Diese Maßnahmen haben eine vergleichsweise kurze Amortisationszeit und bieten sofortige Energieeinsparungen.
2. Phase: Dämmung des Dachs sowie die Installation einer Photovoltaikanlage. Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit der Sanierung und ermöglicht eine direkte Nutzung erneuerbarer Energie.
3. Phase (bei Kernsanierung): Dämmung der Bodenplat-

te zur weiteren Reduzierung des Energieverbrauchs.

Die beste langfristige Lösung wäre die Umsetzung der Gesamtmaßnahme 6 (inklusive Photovoltaik), um eine maximale CO_2-Reduktion und die Einstufung als Effizienzgebäude 40 zu erreichen. Sollte dies aus finanziellen oder baulichen Gründen nicht vollständig umsetzbar sein, stellt eine Kombination aus Maßnahmenpaket 4 (Außenwanddämmung, Fenster-/Türentausch und Photovoltaik) mit späterer Dachsanierung eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative dar.
Diese Strategie ermöglicht eine nachhaltige Sanierung des Berufskollegs mit optimalem Kosten-Nutzen-Verhältnis und einer deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs sowie der CO_2-Emissionen.

MASSNAHME	PAKET	AMORTISATION	EMPFEHLUNG BEI KERNSANIERUNG
GM 1	Dämmung + Fenster/Türen	< 40 Jahre	Ja (Basisvariante)
GM 2	+ Dachdämmung	> 40 Jahre	Nein (kaum zusätzliche Einsparung)
GM 3	+ Bodenplatte	> 40 Jahre	Ja (nur bei Kernsanierung)
GM 4	GM 1 + PV-Anlage	24 Jahre	Ja – wirtschaftlichste Lösung
GM 5	GM 2 + PV-Anlage	37 Jahre	Eher nein
GM 6	GM 3 + PV-Anlage	> 40 Jahre	Ja – höchste Förderung möglich

Tab. 13: Amortisations Annahmen aus dem Sanierungskonzept

4.4 Umfrage

Die durchgeführte Umfrage zur Gebäudequalität und Nutzung des Felix-Fechenbach-Berufskollegs IV zeigt ein differenziertes Bild der Wahrnehmung durch verschiedene Akteure. Die Interviews sind mit verschiedenen Akteuren des Schulwesens durchgeführt worden. Schwerpunkte sind in drei ausführlichen Gesprächen Face-to-Face von jeweils einer Stunde mit der Vertretung der Bauherrschaft, der Lehrerschaft und des Bau- und Sanierungsbetriebs gelegt worden. Die Befragung dieser Personen ist als Stichproben zu verstehen, die aber insofern gezielt getroffen wurde, als das es sich um sehr aktive Personen des Schulalltages handelt, die auf verschiedenen Ebenen mit dem Gebäude und der Nutzung intensiv und engagiert einsetzen. Im Vorfeld haben diese Akteure die Fragen zu dem Interview zur Vorbereitung erhalten, die nun im Anhang zu finden sind. Neben ausführlichen Antworten sind auch exemplarische Räume im Rahmen einer Führung gezeigt und so ein umfassen-



Abb. 61: Umfrage-Karten , die zur Befragung der Schüler- und Lehrerschaft genutzt wurden

des Bild für die Nutzung, Qualitäten und Mängel des FFB IV geschaffen worden.

Die Schülerschaft wurde hingegen auf breiter Basis befragt. Über einen Zeitraum von zwei Tagen wurden während des Schulbetriebs knapp 80 Schülerinnen und Schüler durch den Einsatz bildhafter A4-Umfragebögen direkt angesprochen. Besonders in den Pausen ergaben sich viele Gelegenheiten für eine rege Teilnahme, insbesondere in stark frequentierten Bereichen wie der Mensa und dem Forum. Bei der Erhebung wurde darauf geachtet, eine möglichst ausgeglichene Verteilung nach Geschlechtern sicherzustellen. Die gewählte Methodik des direkten Ansprechens erwies sich als äußerst effektiv, da viele Schülerinnen und Schüler bereitwillig an der Umfrage teilnahmen. Es ist davon auszugehen, dass eine rein digitale Befragung nicht dieselbe fundierte und konstruktive Beteiligung erzielt hätte.

4.4.1 Perspektive der Bauherrschaft (Karen Zereike)

In der Befragung von Karen Zereike sind im Vorfeld die Zahlen und Ergebnisse der biRegio Analyse zur Schulentwicklung des Berufskollegs untersucht worden. Da sich in diesen Ergebnissen abzeichnet, wie sich die SchülerInnen Zahlen in den nächsten Jahren verhalten, war es im Interview besonders interessant, was sich hinter diesen Zahlen verbirgt. Die Frage war daher, ob schulorganisatorische Entwicklungen diese Zahlen beeinflussen oder ob es reine Prognosen aus der Bevölkerungsentwicklung sind. Ebenso sollte in der Befragung der Schwerpunkt auf die Sichtweise der Bauherrenschaft gelegt werden. Auch wenn es sich dabei nicht um die Gruppe der Nutzerschaft des Gebäudes handelt, sind diese aber für die Entwicklung des zukünftigen Berufskollegs ganz wichtige Akteure, vor allem was die Finanzierung des Projektes angeht. Um eine neue Entwicklung des Berufskollegs einzuleiten, sind sicherlich die LehrerInnen und SchülerInnen diejenigen, die den Einfluss machen sollten. Aber es war spannend herauszufinden, ob die Visionen dieser

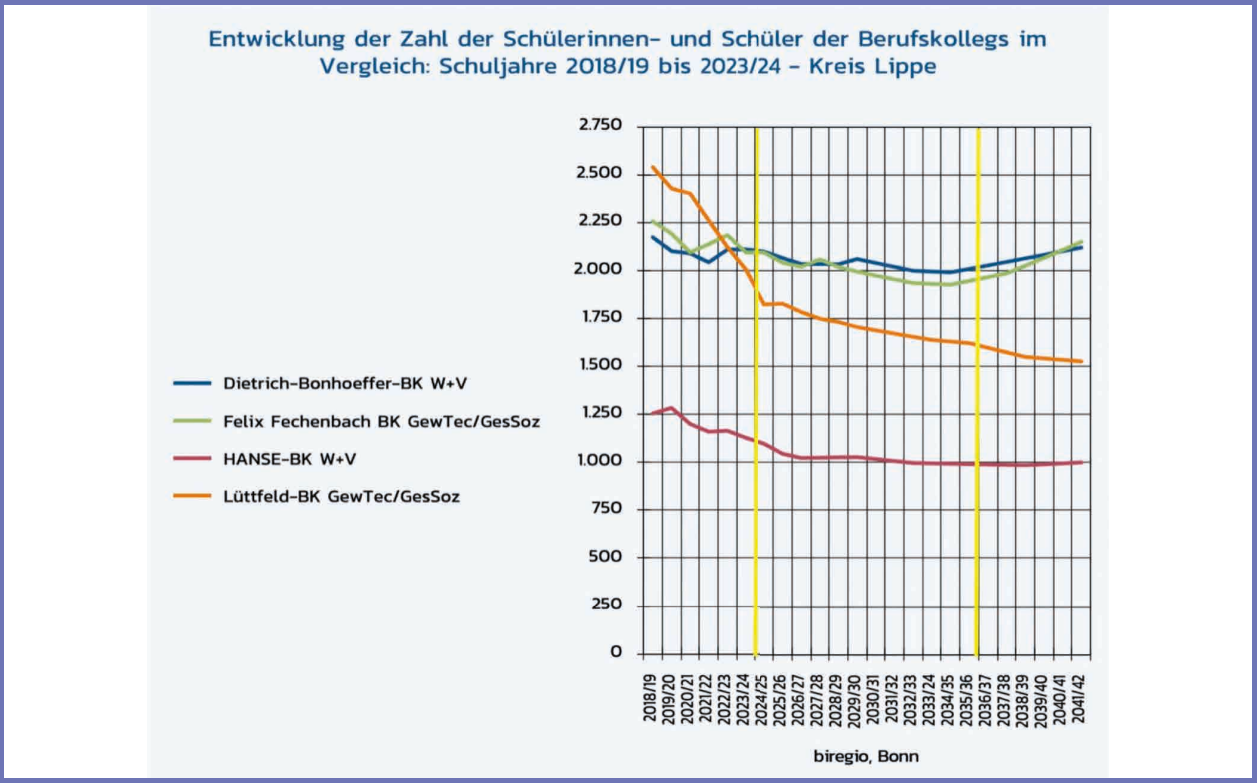


Abb. 62: Überblick über die Entwicklung von Nutzerzahlen an den diversen Standorten der Berufsschule

verschiedenen Akteure für die zukünftige Lehre übereinstimmen.

Im Gespräch mit Karen Zereike, Vertreterin der Bauherrenschaft, wurde zunächst die Schulentwicklungsanalyse von biRegio thematisiert. Eine zentrale Fragestellung war, ob sich die prognostizierten Schülerzahlen rein aus demografischen Entwicklungen ergeben oder ob auch schulorganisatorische Veränderungen eine Rolle spielen. Zereike machte deutlich, dass die Entwicklung der Schülerzahlen primär auf statistischen Bevölkerungsprognosen basiert und weniger auf internen schulstrukturellen Maßnahmen.

Ein weiteres wichtiges Thema war die Gestaltung zukünftiger Lehr- und Lernräume. Die Frage, welche baulichen Maßnahmen notwendig sind, um moderne Lehrformen und neue Berufsanforderungen angemessen zu berücksichtigen, wurde intensiv diskutiert. In diesem Zusammenhang wurde problematisiert, dass viele Lehrkräfte an festen Räumen festhalten, was eine flexible Nutzung

erschwert. In der Befragung wurde daher auch die Einführung eines Raumbuchungssystems als mögliche Alternative erörtert.

Ein kritischer Punkt war zudem die derzeitige Anordnung der Fachbereiche. Die Frage, ob eine geschossweise Trennung sinnvoll ist oder ob eine stärkere Durchmischung Synergien fördern könnte, führte zu einer Debatte über die Effizienz der derzeitigen Raumnutzung. Auch die Anzahl der Fachräume wurde hinterfragt, insbesondere im Hinblick darauf, ob alle sechs Fachräume tatsächlich benötigt werden oder ob eine effizientere Nutzung der Flächen möglich wäre.

Von besonderer Bedeutung für die Bauherrenschaft ist außerdem die Frage der Finanzierung und Umsetzung möglicher Sanierungsmaßnahmen. Im Interview wurde daher die Problematik der temporären Auslagerung von rund 800 Schülerinnen und Schülern während möglicher Bauphasen thematisiert. Eine der zentralen Fragen lautete, welche Alternativen es zur häufig gewählten Containerlösung gibt, um Kosten und Einschränkungen möglichst gering zu halten. Die Notwendigkeit innovativer Übergangslösungen wurde in diesem Zusammenhang betont.

4.4.2Perspektive der Lehrerschaft (Kai Schwabe)

Stellvertretend für die Lehrerschaft wurde Studiendirektor Kai Schwabe, Leiter der Elektroabteilung, zur räumlichen Nutzung und Gestaltung des Schulgebäudes befragt. In der Befragung wurde erörtert, welche Vor- und Nachteile das aktuelle Raumkonzept mit sich bringt und welche Anpassungen aus Sicht der Lehrkräfte notwendig wären.

Ein zentrales Thema stellte die Nutzung fester Klassenzimmer dar. Kai Schwabe betonte, dass viele Lehrkräfte feste Räume bevorzugen, da diese eine ruhige Arbeitsumgebung bieten und die Möglichkeit eröffnen, eine



Abb. 63: Blick in einen exemplarischen Technikraum

persönliche Atmosphäre zu schaffen, die die Motivation der Lehrenden und Lernenden fördert. Gleichzeitig wurde aber auch diskutiert, inwiefern eine flexiblere Nutzung der Räume, beispielsweise durch ein Buchungssystem, Vorteile mit sich bringen könnte. Hierzu gab es innerhalb des Kollegiums unterschiedliche Meinungen – während einige Lehrkräfte die feste Zuordnung als notwendig erachteten, sahen andere in einem flexibleren Modell Potenzial für eine effizientere Nutzung der Raumkapazitäten.

Ein weiteres Kernthema war die klimatische Situation im Gebäude. Schwabe schilderte, dass sowohl die Hitze im Sommer als auch die unzureichende Beheizung im Winter erhebliche Probleme im Schulalltag darstellen. Die schlechte thermische Isolierung führe dazu, dass das Gebäude in heißen Monaten unangenehm aufheizt, während im Winter durchgehend geheizt werden müsse, um ein angemessenes Raumklima zu gewährleisten.

Besonders kritisch äußerte sich Schwabe zur Gesamt-

wahrnehmung des Gebäudes. Er sprach von einer „Lost-Place-Identity“, die sich insbesondere aus der veralteten Architektur, den ungenutzten Räumen und der insgesamt wenig einladenden Gestaltung des Gebäudes ergebe. Diese Atmosphäre erschwere es sowohl den Lehrkräften als auch den Schülern, sich mit dem Gebäude zu identifizieren. Eine zeitgemäße Lernumgebung sollte jedoch inspirierend wirken und eine gewisse Aufenthaltsqualität bieten, was derzeit nicht gegeben sei.

Ein weiteres wichtiges Thema war die Nutzung des Forums für Unterrichtszwecke. Schwabe erklärte, dass sich das Forum in seiner jetzigen Form kaum für den Unterricht eigne. Akustische Herausforderungen, eine fehlende technische Ausstattung und die offene Gestaltung machten es schwierig, den Raum für strukturierte Lernformate zu nutzen. Er sieht jedoch Potenzial in einer alternativen Nutzung des Forums – beispielsweise als moderierten Lernbereich oder als Raum für Veranstaltungen und freizeitliche Aktivitäten außerhalb des Unterrichts. Dafür wären allerdings gezielte bauliche Anpassungen notwendig.

Auch zur Mensa nahm Schwabe Stellung. Er stellte fest, dass nicht alle Lehrkräfte die Mensa regelmäßig nutzen, was teilweise an der Qualität des Essens liege. Zudem wurde infrage gestellt, ob die Mensa in ihrer derzeitigen Größe tatsächlich notwendig sei oder ob eine effizientere Nutzung des Raumes denkbar wäre.

Zusammenfassend betonte Kai Schwabe, dass die derzeitige Raumstruktur zwar grundsätzlich funktional sei, jedoch an mehreren Stellen Optimierungsbedarf bestehe. Besonders die klimatischen Bedingungen, die Identität des Gebäudes und die ungenutzten Potenziale des Forums und der Mensa seien Punkte, die dringend überdacht werden sollten.

4.4.3Perspektive des Baubetriebs (Jolina Perreth)

Im Rahmen der Befragung wurde Jolina Perreth als Vertreterin des Bau- und Sanierungsbetriebs interviewt. Ihre Perspektive ist besonders relevant, da sie nicht nur für die bauliche Instandhaltung des Gebäudes verantwortlich ist, sondern auch wertvolle Einblicke in die strukturellen Herausforderungen und Potenziale des Felix-Fechenbach-Berufskollegs IV geben konnte. Das Interview konzentrierte sich auf bauliche Qualitäten, bestehende Mängel sowie mögliche Sanierungsmaßnahmen und Zukunftsperspektiven.

Jolina Perreth hebt hervor, dass das Gebäude in seiner Grundstruktur einige positive Merkmale aufweist. Besonders lobt sie die großzügigen, gut proportionierten Räume, die viel Tageslicht erhalten und durch ihre Systemwände eine gewisse Flexibilität in der Nutzung ermöglichen. Auch die Sichtbeziehungen innerhalb der





Abb. 64: Blick auf eine Mangelsituation: Wasserschaden infolge eines undichten Daches

Räume und zum Außenbereich werden als angenehm empfunden. Akustisch sei das Gebäude weitgehend funktional, da viele Bereiche über schalldämpfende Maßnahmen verfügen. Ein weiterer Vorteil sei die Möglichkeit, durch große Schaufensterflächen verschiedene Ausbildungssparten sichtbar zu machen und so eine stärkere Verbindung zwischen Theorie und Praxis herzustellen. Diese Transparenz sei ein wertvolles Gestaltungselement, das den Charakter der Schule als praxisorientiertes Berufskolleg unterstreicht.

Die Lage des Gebäudes innerhalb eines Wohngebiets wird ebenfalls als Vorteil gesehen. Es bietet eine gewisse Anbindung an das soziale Umfeld und ermöglicht den Schülern kurze Wege zwischen Wohnort, Schule und möglichen Praktikumsplätzen.

Trotz dieser positiven Merkmale macht Jolina Perreth deutlich, dass erhebliche bauliche Mängel bestehen, die dringend angegangen werden müssen. Ein zentrales Problem stellt die unzureichende Klimatisierung des Gebäudes dar. Die Sommermonate sind durch eine erhebliche Hitzeentwicklung geprägt, da eine funktionierende Lüftungsanlage aufgrund von Brandschutzvorschriften nicht mehr genutzt werden kann. Dies führt dazu, dass sich die Räume stark aufheizen und der Unterricht unter extremen Bedingungen stattfinden muss. Im Winter hingegen sind die Temperaturen oft zu niedrig, sodass durchgehend geheizt werden muss, um ein angenehmes Lernklima zu gewährleisten.

Ein weiteres gravierendes Problem ist der Wassereintritt durch die Shed-Dächer. Diese Konstruktionsweise führt dazu, dass insbesondere bei starken Regenfällen Feuchtigkeit ins Gebäude eindringt. Dies hat nicht nur zur Folge, dass bauliche Schäden entstehen, sondern begünstigt auch die Bildung von Schimmel, was langfristig gesundheitliche Risiken für die Schüler und Lehrkräfte darstellt.

Auch in Bezug auf die Barrierefreiheit weist das Gebäude erhebliche Defizite auf. Innerhalb der Geschosse gibt es

keine Aufzüge, sodass mobilitätseingeschränkte Personen große Schwierigkeiten haben, sich im Gebäude frei zu bewegen. Neben der fehlenden vertikalen Erschließung betont Perreth, dass auch die Orientierung innerhalb des Gebäudes problematisch ist. Die sogenannten „Flurstraßen“ sind langgezogen, wenig strukturiert und laden weder zum Aufenthalt noch zum Austausch ein. Dies führt dazu, dass sich insbesondere neue Schüler schwer zurechtfinden und das Gebäude als wenig einladend wahrgenommen wird.

Auch Schadstoffe stellen ein ernstzunehmendes Problem dar. Laut Perreth gibt es Hinweise darauf, dass einige Stützen und Deckenelemente des Gebäudes schadstoffhaltige Materialien wie KMF-Wolle enthalten. Eine umfassende Schadstoffanalyse sei dringend erforderlich, um gesundheitliche Risiken zu bewerten und geeignete Sanierungsmaßnahmen zu planen.

Jolina Perreth macht deutlich, dass zahlreiche Maßnahmen notwendig sind, um das Gebäude funktionaler und zukunftsfähiger zu gestalten. Besonders wichtig sei eine Sanierung der Lüftungsanlage sowie eine Optimierung des Sonnenschutzes, um die klimatischen Bedingungen zu verbessern. Zudem müsse geprüft werden, ob durch bauliche Maßnahmen eine bessere Durchmischung der Fachbereiche erreicht werden kann. Derzeit sind viele Abteilungen geschossweise getrennt, was zwar organisatorische Vorteile bietet, aber Synergien zwischen den verschiedenen Ausbildungsbereichen erschwert.

Die Mensa wird als zu groß dimensioniert eingeschätzt, was dazu führt, dass viele Schüler auf andere Gebäude ausweichen. Eine kompaktere, bedarfsgerechtere Lösung könnte die Aufenthaltsqualität in diesem Bereich erhöhen. Auch die Aula bleibt weitgehend ungenutzt und könnte durch eine gezielte Umgestaltung besser in den Schulalltag integriert werden.

Ein besonders dringender Punkt ist die Verbesserung der Barrierefreiheit. Die Installation eines Aufzugs wird als essenziell angesehen, um allen Schülern eine gleich-

berechtigte Nutzung der Schulräume zu ermöglichen. Zudem sollte die Orientierung innerhalb des Gebäudes durch eine klarere Strukturierung der Flure und eine optimierte Beschilderung erleichtert werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Gebäude in seiner Grundstruktur Potenzial bietet, aber dringend sanierungsbedürftig ist. Insbesondere die klimatischen Bedingungen, die Barrierefreiheit und die Schadstoffbelastung stellen erhebliche Herausforderungen dar, die aus Sicht des Baubetriebs priorisiert angegangen werden sollten. Nur durch gezielte bauliche Maßnahmen kann das Felix-Fechenbach-Berufskolleg IV zu einem modernen, funktionalen und lernfreundlichen Ort werden.

4.4.4 Perspektive der Schülerschaft

Die Befragung der Schülerschaft des Felix-Fechenbach-Berufskollegs liefert aufschlussreiche Erkenntnisse über die Nutzung und Wahrnehmung der vorhandenen Räumlichkeiten. Ein zentraler Aspekt ist die Aufenthaltsdauer der SchülerInnen am Standort: Dabei ergab sich, dass die meisten Schüler zwischen einem und drei Jahren am Felix-Fechenbach-Berufskolleg verweilen. Während einige Schüler das Gebäude nur für einzelne Berufsausbildungsmodule nutzen, sind andere über mehrere Jahre in verschiedenen Fachbereichen aktiv. Am Tag wird das Gebäude zwischen 6-8 Stunden für Schulzwecke genutzt. Ansonsten gibt es auch noch ein Studierenden Programm, bei dem im Rahmen einer Abendschule Bachelorabschlüsse erarbeitet werden. Das findet in der Regel 2-3 die Woche von 18-21 Uhr statt und betrifft circa 60 Studenten.

Besonders häufig genutzte Räume sind die Mensa, das Forum, Klassenräume, Werkstätten und Computerräume. Allerdings gibt es Unterschiede zwischen den bevorzugten Aufenthaltsorten und den meistgenutzten Räumen. Die am häufigsten genutzten Räume sind mit 68 % die Klassenräume, während die Fachräume von 25 % der Schüler verwendet werden. Das Forum wird von

WIE LANGE BIST DU AN DER BERUFSSCHULE AM TAG?

6-8 Stunden

100%

WIE KOMMST DU ZUR BERUFSSCHULE?

Mit dem Auto

50%

Mit dem Bus

43%

Zu Fuß

13%

Fahrrad, Bahn etc.

0%

WO VERBRINGST DU DEINE FREISTUNDEN?



50%

Draußen

Mensa



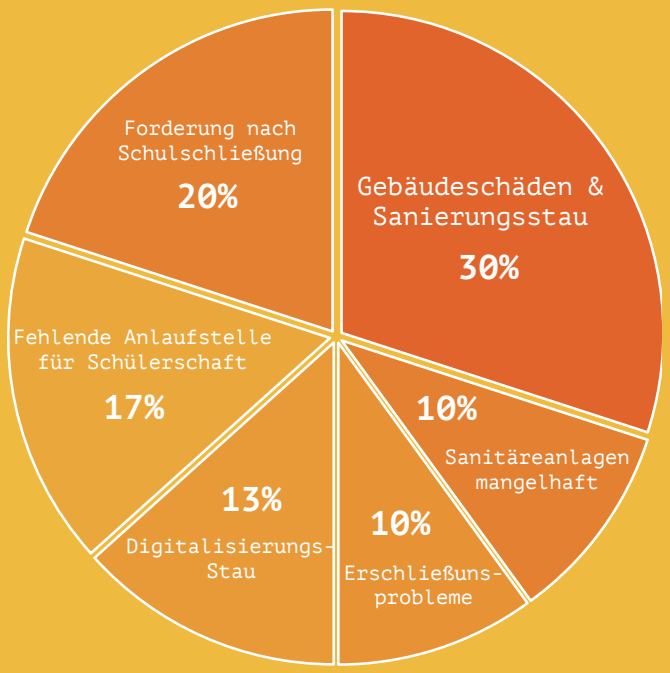
31%



12%

Forum

WAS SIND SCHWACHSTELLEN DER BERUFSSCHULE?



WELCHE RÄUME NUTZT DU AM MEISTEN?

Klassenraum

68%

Mensa

25%

Fachraum*

25%

Werkraum

1%

*Lehrerschaft nutzt oftmals Fachraum als Vorbereitungs-raum. Fachräume sind je einem Lehrer zugeordnet.

den meisten Schülern nur als Durchgangsbereich oder Aufenthaltsfläche in den Pausen genutzt, während die Mensa eher gemieden wird. Viele Schüler verbringen ihre Freistunden stattdessen im Außenbereich oder in anderen Schulgebäuden, da sie die Aufenthaltsqualität in Gebäude IV als unzureichend empfinden. Dies deutet darauf hin, dass die bestehenden Lernräume nicht unbedingt als Orte des freiwilligen Aufenthalts oder des Austauschs wahrgenommen werden.

In Bezug auf die bauliche Qualität des Gebäudes äußerten sich die Schüler überwiegend kritisch. 30 % der Befragten gaben an, dass Gebäudeschäden und Sanierungsstau ein großes Problem darstellen. 20 % der Schüler sprachen sich sogar für eine vollständige Schließung des Gebäudes aus, da der bauliche Zustand ihrer Meinung nach nicht mehr tragbar sei. Weitere 10 % bemängelten die mangelnden Sanitäranlagen, während 10 % Erschließungsprobleme beklagten. Der Digitalisierungsstau wurde von 13 % der Schüler als problematisch eingestuft, während 17 % das Fehlen von Anlaufstellen für Schüler monierten.

Auch die Erreichbarkeit des Gebäudes spielt eine Rolle: Die Schüler*innen kommen auf unterschiedlichen Wegen – zu Fuß, mit dem Fahrrad, dem Bus oder der Bahn – was auf eine diverse Mobilitätsstruktur hinweist. Dies könnte bei zukünftigen Planungen zur Barrierefreiheit und Anbindung berücksichtigt werden.

Die Gesamtbewertung des Gebäudes liegt durchschnittlich bei drei Sternen. Besonders problematisch wird die fehlende Barrierefreiheit innerhalb der Geschosse gesehen. Einige Schüler äußerten den Wunsch nach flexibleren Raumkonzepten, um eine bessere Nutzung der vorhandenen Flächen zu ermöglichen. Zudem wurde gefordert, dass Aufenthaltsbereiche für Schüler attraktiver gestaltet und modernisiert werden sollten. Zusammenfassend zeigt die Umfrage, dass es ein Bedürfnis nach einer stärkeren Differenzierung zwischen Lern- und Aufenthaltsräumen gibt. Während funktionale Unterrichtsräume zwar genutzt werden, fehlt es an ansprechenden

WIE SOLLTE DER LERNORT DER ZUKUNFT AUSSEHEN?



57%



43%



12%



25%

WIE WÜRDEST DU DIE BERUFSSCHULE BEWERTEN?

3 STERNE

★★★☆☆

WIE SOLLTE DER TREFFPUNKT DER ZUKUNFT AUSSEHEN?



43%



25%



19%



12%

Treffpunkten, die den Austausch und das Wohlbefinden fördern.

4.4.5 Fazit

Die Ergebnisse der Umfrage zur Gebäudequalität und Nutzung des Felix-Fechenbach-Berufskollegs IV verdeutlichen ein vielschichtiges Bild. Das wird auch durch direkte Aussagen treffend zusammengefasst (siehe Schaubild). Während das Gebäude in einigen Aspekten funktionale Strukturen aufweist, bestehen erhebliche bauliche und organisatorische Defizite, die sowohl von der Bauherrenschaft als auch von der Lehrerschaft, den Schülern und dem Baubetrieb kritisch betrachtet werden. Ein zentrales Problem stellt die klimatische Situation dar. Sowohl Lehrkräfte als auch Schüler berichten von unangenehmen Temperaturen, die durch eine unzureichende thermische Isolierung entstehen – im Sommer überhitzt das Gebäude stark, im Winter müssen die Räume durchgehend beheizt werden. Die ursprüngliche Lüftungsanlage kann aufgrund von Brandschutzauflagen nicht genutzt werden, sodass sich insbesondere in den wärmeren Monaten die Raumbedingungen als problematisch erweisen. Auch in Bezug auf die bauliche Substanz gibt es erhebliche Mängel. Durch undichte Dachflächen dringt Wasser ein, was nicht nur zu Feuchtigkeitsschäden, sondern auch zu Schimmelbildung führt. Darüber hinaus weisen einige Bauelemente schadstoffhaltige Materialien wie KMF-Wolle auf, sodass eine umfassende Schadstoffanalyse dringend erforderlich ist.

Ein weiteres zentrales Defizit ist die fehlende Barrierefreiheit innerhalb der Geschosse. Das Fehlen von Aufzügen erschwert es mobilitätseingeschränkten Personen, sich im Gebäude frei zu bewegen. Hinzu kommt, dass die Orientierung im Gebäude als äußerst schwierig beschrieben wird. Die als „Flurstraßen“ angelegten Gänge sind unübersichtlich, langgezogen und wenig strukturiert, sodass es insbesondere für neue Schüler und Besucher schwerfällt, sich zurechtzufinden. Diese Flurstraßen laden weder zum Aufenthalt noch zum Austausch

WAS IST DIE QUALITÄT DER BERUFSSCHULE?

„Immer kleine Schaufenster mit Ausstellungsflächen der Ausbildungssparten!“

- Schülerin der Berufsschule

„Großzügige Räume, gut proportioniert, meist viel Licht sowie Sichtbeziehungen zu den Fluren über Systemwände. Aber wie viel Fläche braucht man wirklich?“

- Jolina Perreth,
Leitung Bestandsschutz und -sanierung

„Der Ansatz der Multifunktionalen-Vernetzung der unterschiedlichen Berufsgruppen schafft Synergien wie im Berufsleben. Vielleicht kann man den Austausch auch auf den Ebenen fördern und nicht alle Bereiche Geschossweise trennen.“

- Karen Zereike, Leiterin Eigenbetrieb Schule

„Hier könnte man auch ein Parkhaus draus‘ machen, so gut ist das Gebäude statisch geplant!“

- Statiker

„Das Forum ist so großzügig, wieso findet da eigentlich nach Schulschluss nichts statt?“

- Schülerin der Berufsschule

„Man trifft immer jemanden auf den Fluren oder in der Mensa!“

- Schüler der Berufsschule

„Die Kombination aus Laboren und Klassenräumen stellt ein funktionierendes Raumkonzept dar!“

- Kai Schwabe, Abteilungsleitung Elektrotechnik

ein, wodurch wertvolle kommunikative Begegnungen innerhalb der Schulgemeinschaft erschwert werden. Die fehlende Aufenthaltsqualität trägt zudem dazu bei, dass sich viele Schüler und Lehrkräfte mit dem Gebäude kaum identifizieren. Besonders von der Lehrerschaft wird eine „Lost-Place-Identity“ beklagt – eine Atmosphäre, die wenig einladend wirkt und kaum eine inspirierende Lernumgebung schafft. Dies wird durch eine unzureichende Beleuchtung sowie die fehlende gestalterische Einbindung in den Außenraum noch verstärkt.

Die Nutzung der Gemeinschaftsbereiche wird ebenfalls kritisch hinterfragt. Die Mensa wird von vielen Schülern gemieden, was sowohl an der Qualität des Essens als auch an der möglicherweise zu groß dimensionierten Fläche liegt. Die Aula bleibt weitgehend ungenutzt, obwohl sie Potenzial für schulische oder außerunterrichtliche Aktivitäten hätte. Auch das Forum wird aus Sicht der Lehrkräfte als wenig praktikabel für Unterrichtszwecke betrachtet, da es weder akustisch noch technisch ausreichend ausgestattet ist.

Um diese Probleme zu lösen, bedarf es gezielter Maßnahmen, die die unterschiedlichen Perspektiven aller Akteure berücksichtigen. Die klimatischen Bedingungen müssen durch eine funktionierende Lüftung sowie eine bessere Isolierung optimiert werden. Eine Verbesserung der Barrierefreiheit ist unerlässlich, um eine gleichberechtigte Nutzung für alle Schüler und Lehrkräfte zu ermöglichen. Gleichzeitig sollte das Gebäude gestalterisch aufgewertet werden, um die Aufenthaltsqualität zu steigern und eine stärkere Identifikation mit dem Lernort zu schaffen. Ein Lichtkonzept könnte für angenehmere Raumbedingungen sorgen, während eine stärkere Einbindung in die Außenflächen eine Verbindung zwischen Innen- und Außenraum herstellt. Auch die Nutzung der Gemeinschaftsräume muss überdacht werden. Die Mensa könnte konzeptionell neu ausgerichtet oder verkleinert werden, während das Forum durch technische und akustische Maßnahmen für den Unterricht besser nutzbar gemacht werden sollte. Besonders wichtig wäre zudem eine strukturelle Neugestaltung der Flurstraßen,

um die Orientierung zu verbessern und mehr kommunikative Aufenthaltszonen zu schaffen.

Trotz der bestehenden Defizite gibt es Aspekte, die aus Sicht aller Beteiligten positiv bewertet werden. Die Klassenraumkonfiguration ist grundsätzlich funktional und ermöglicht eine klare Trennung der Fachbereiche, was eine gezielte Nutzung für spezifische Unterrichtsformate begünstigt. Die Materialwahl des Gebäudes erweist sich als robust und widerstandsfähig, sodass eine nachhaltige Sanierung auf dieser Grundlage möglich wäre. Zudem schätzen viele Lehrkräfte, dass sie ihre Klassenräume individuell als Arbeitsräume nutzen können, was eine gewisse Flexibilität im Schulalltag bietet.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Gebäude in seiner aktuellen Form zwar nutzbar ist, jedoch erhebliche bauliche, klimatische und funktionale Defizite aufweist, die aus der Sicht aller Beteiligten angegangen werden müssen. Während einige bestehende Strukturen eine Grundlage für Optimierungen bieten, erfordert die Zukunftsfähigkeit des Gebäudes gezielte Maßnahmen, um eine zeitgemäße und lernförderliche Umgebung zu schaffen. Besonders im Hinblick auf die klimatischen Bedingungen, die Barrierefreiheit sowie die Nutzung der Gemeinschaftsräume besteht dringender Handlungsbedarf, um die Schule zu einem Ort zu machen, an dem sich sowohl Schüler als auch Lehrkräfte wohlfühlen und produktiv arbeiten können.

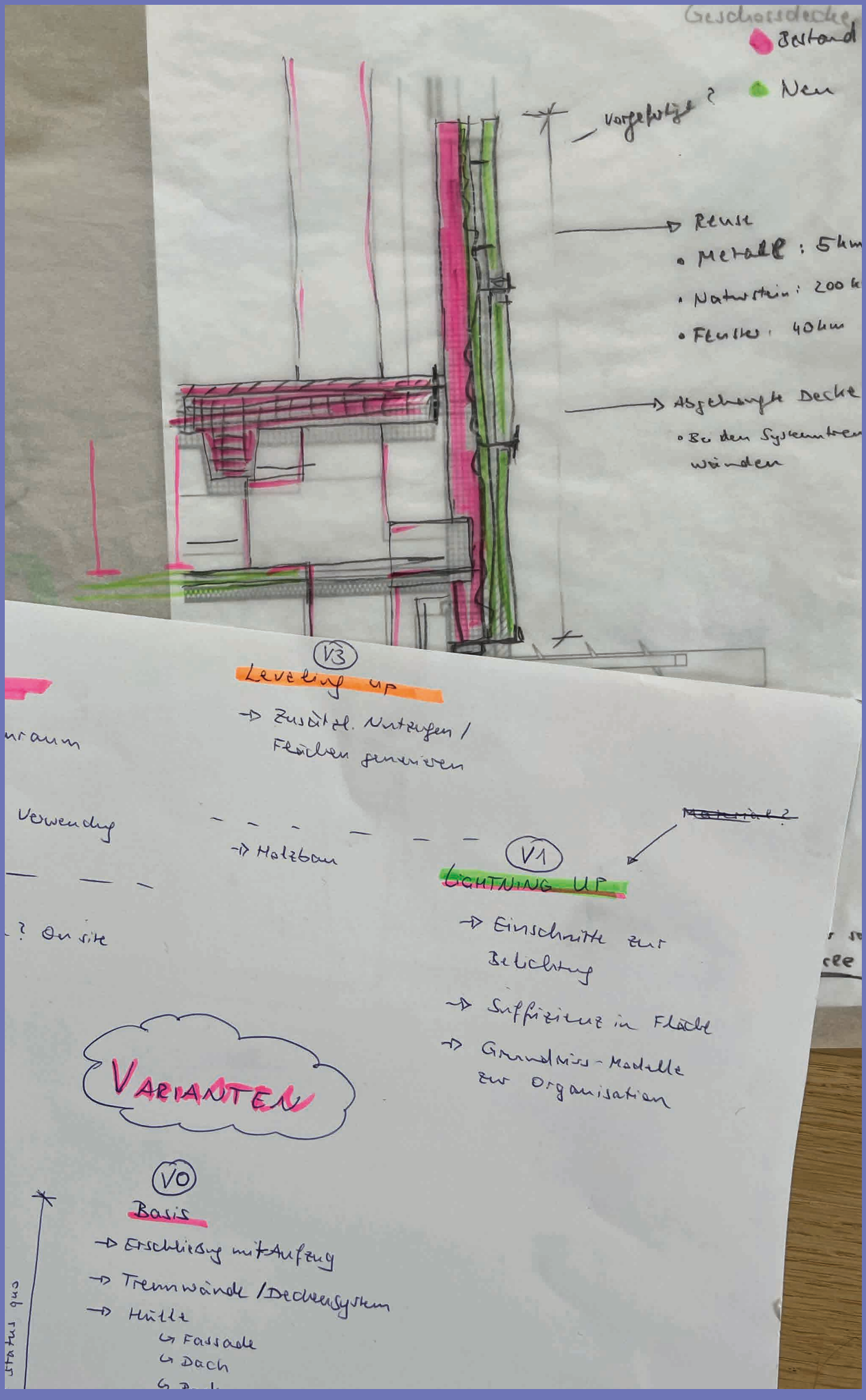


Foto: Eigenes

5
ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG ADAPTIVER UND ZIRKULÄRER ENTWURFSMETHODEN

Auf Grundlage der Bestandsanalyse und der theoretischen sowie praktischen Erkenntnisse vorangehender Kapitel werden in diesem Abschnitt konkrete Entwurfsmethoden für die Transformation des Felix-Fechenbach-Berufskollegs entwickelt. Im Fokus stehen adaptive Strategien, die räumliche Flexibilität, materialgerechtes Konstruieren und langfristige Rückbaubarkeit verbinden. Digitale Werkzeuge wie Concular und eigens weiterentwickelte Bewertungsansätze dienen dazu, Varianten hinsichtlich ihrer ökologischen, ökonomischen und gestalterischen Qualität vergleichend zu analysieren. Ziel ist es, integrative Entwurfskonzepte zu formulieren, die nicht anur auf den Bestand reagieren, sondern aktiv zukunftsfähige Architektur im Sinne zirkulären Planens gestalten.

5.1 Potenziale und Mängel der Gebäudestruktur – Erkenntnisse aus der Analyse

Die Analyse des Bestandsgebäudes FFB IV zeigt ein differenziertes Bild struktureller Potenziale und funktionaler Schwächen, die zentrale Ausgangspunkte für die Entwicklung zirkulärer und adaptiver Entwurfsmethoden darstellen. Besonders hervorzuheben ist die Grundstruktur des Gebäudes: Das klare Stützenraster in Kombination mit der robusten Tragstruktur aus Stahlbeton schafft eine hohe Flexibilität, die unterschiedliche Nutzungsvarianten zulässt. Die Struktur erlaubt eine weitgehende Anpassung an sich wandelnde Anforderungen, was insbesondere im Hinblick auf zukünftige Umnutzungsszenarien von großem Vorteil ist. Die Ebenen sind hoch belastbar ausgelegt, wodurch sowohl horizontale als auch vertikale Erweiterungen oder Subtraktionen grundsätzlich denkbar sind.

Ein wesentlicher Mangel besteht jedoch in der Materialwahl der sekundären Bauteile. Viele der derzeit verbauten Elemente – etwa Fassadendämmung, Fenster oder Bodenbeläge – enthalten Schadstoffe und sind damit nicht nur unter baubiologischen Aspekten problematisch, sondern auch aus Sicht der Kreislauffähigkeit kritisch zu betrachten. Diese Bauteile scheiden aus der zirkulären Weiterverwendung aus. Dennoch bieten sie eine wichtige Orientierungsgrundlage: Ihre ursprüngliche Konzeption zeugt von einem grundsätzlich funktionalen und langlebigen Ansatz – robuste Materialien wie Metall oder strapazierfähiger PVC-Belag wurden bewusst eingesetzt. Daraus ergibt sich ein Lernpotenzial für zukünftige Planungen: Es gilt, die positiven Aspekte der Bestandsbauteile aufzunehmen, dabei aber konsequent auf schadstofffreie und kreislauffähige Materialien umzusteigen, um eine gesunde und nachhaltige Raumqualität sicherzustellen.

Die gegenwärtige Nutzungsverteilung wird von den Gebäudenutzenden – insbesondere Lehrenden und Ler-



Abb. 65: Mängel- und Potenzialplan EG maßstabslos

nenden – überwiegend positiv bewertet. Die funktionale Trennung in Klassenräume, Vorbereitungsräume, Lehrerarbeitsplätze sowie Übungs- und Laborräume hat sich etabliert und wird als sinnvoll empfunden. Besonders in der technischen und handwerklichen Ausbildung spielt die räumliche Nähe zu Wasch- und Nebenräumen eine zentrale Rolle für die Sicherheit und Praktikabilität des Unterrichts. Diese Organisation spricht für die Beibehaltung der funktionalen Grundstruktur im Rahmen zukünftiger Planungen.

Die innere Raumstruktur erweist sich dank flexibler Trennwände als wandelbar und erlaubt die Realisierung unterschiedlich großer Räume. Dadurch wird nicht nur die bestehende Aufteilung gestützt, sondern auch ein zukünftiges Weiterdenken in Richtung offener, rasterorientierter Planungsansätze ermöglicht. Diese Flexibilität stellt eine zentrale Qualität dar, die im Sinne adaptiver Planung weiter genutzt und gestärkt werden sollte.

Gleichzeitig zeigen sich deutliche Defizite in der Belichtungssituation. Besonders Flure und einzelne Nutzungsbereiche genügen nicht den aktuellen Anforderungen, wie sie beispielsweise in der Schulbaurichtlinie formuliert sind. Oberlichter sind zwar vorhanden, reichen jedoch nicht aus, um die erforderliche Tageslichtversorgung sicherzustellen. Es fehlt eine seitliche Belichtung, die für eine angenehme und gesunde Lernumgebung notwendig wäre.

Ein weiteres zentrales Defizit betrifft die gemeinschaftlichen Bereiche im Gebäude. Insbesondere das Forum und die Mensa werden nach dem eigentlichen Nutzungszeitraum kaum verwendet. Die bauliche Konfiguration erlaubt keine flexible Nutzung, sodass Potenziale zur gemeinschaftlichen Aktivierung weitgehend ungenutzt bleiben. Ausstellungen, Projektarbeiten oder schulische Veranstaltungen sind dort zwar grundsätzlich möglich, erfordern jedoch einen hohen organisatorischen Aufwand und bieten keinen strukturell einladenden Rahmen. Eine Öffnung dieser Bereiche über den Schulbetrieb hinaus – etwa für die Nachbarschaft – erscheint

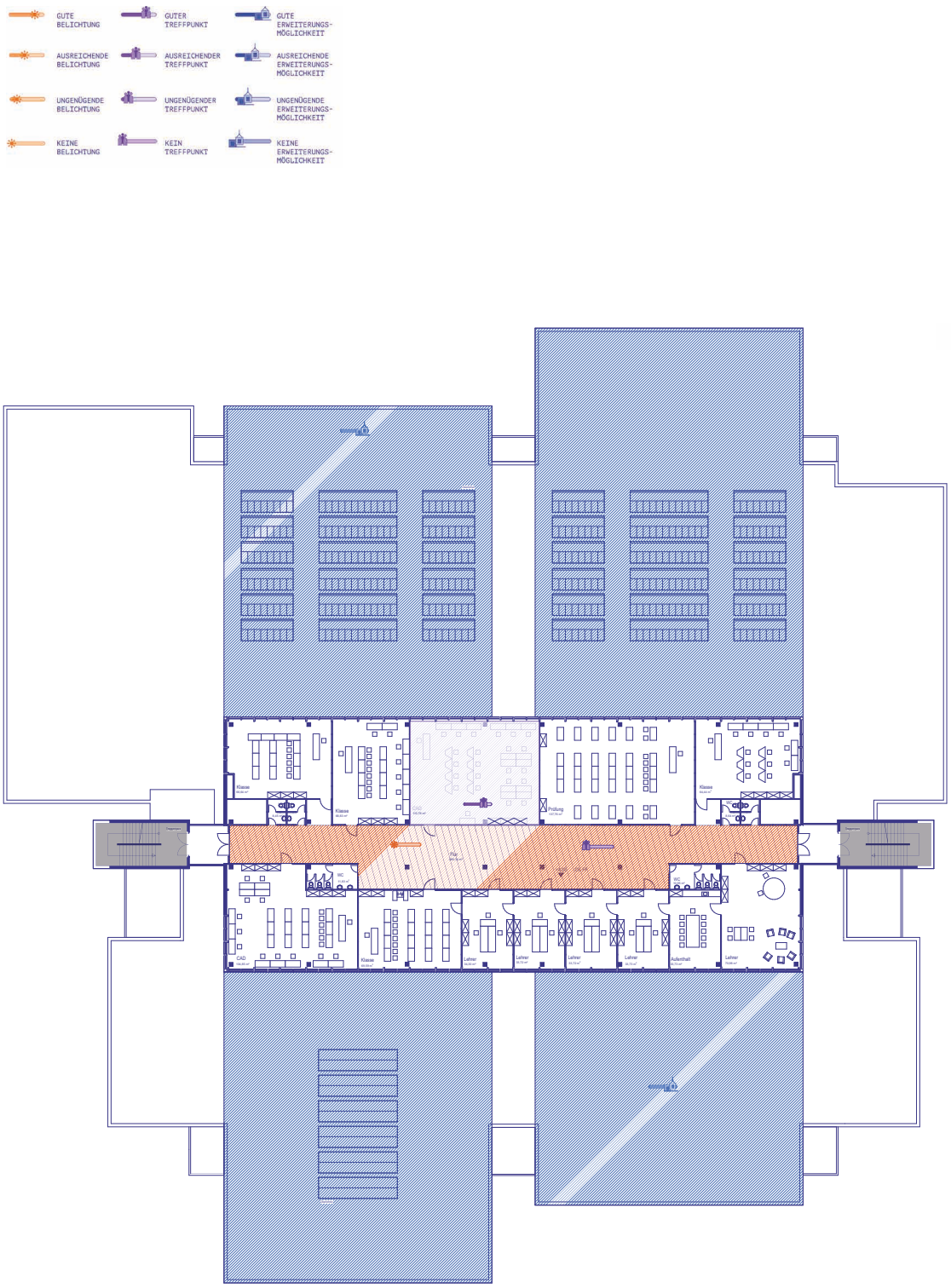


Abb. 66: Mängel- und Potenzialplan OG
maßstabslos

daher sinnvoll und wird als strategisches Ziel formuliert.

Hinzu kommt die mangelnde Verbindung zwischen Innen- und Außenraum. Der terrassierte Außenbereich ist weitgehend versiegelt und wirkt wenig einladend. Die räumliche Qualität ist eingeschränkt, Aufenthalts- und Kommunikationsorte fehlen. Dadurch wird das Potenzial, den Außenraum als erweiterten Lern- und Begegnungsraum zu begreifen, bislang nicht ausgeschöpft.

Aus diesen Analysen lassen sich zentrale Handlungsfelder für die weitere Planung ableiten. Die folgenden Schwerpunkte bildeten die Grundlage für die Entwicklung der Umnutzungskonzepte im weiteren Verlauf der Arbeit:

Erstens zeigt sich das große Potenzial einer gezielten Aufwertung des Bestandes durch geringinvasive Eingriffe. Die vorhandene Struktur und funktionale Gliederung bieten viele Anknüpfungspunkte, doch erfordern eine Verbesserung in Hinblick auf Schadstofffreiheit und Belichtung. Durch gezielte Öffnungen von Systemtrennwänden – ein dem Bauteil inhärenter konstruktiver Vorteil – lassen sich neue räumliche Verbindungen und offene Lernlandschaften schaffen. Diese Maßnahmen müssen jedoch mit baubiologisch einwandfreien Materialien umgesetzt werden, um gesundheitliche Risiken auszuschließen und Materialkreisläufe zu ermöglichen. Materialien mit Schadstoffanteilen führen direkt zur Deponierung und widersprechen somit den Grundprinzipien des zirkulären Bauens.

Zweitens wird eine Erhöhung der Flächennutzung innerhalb des Gebäudes angestrebt. Gezielt eingesetzte Subtraktionen – etwa in Form von Lichthöfen oder Belichtungsachsen – können die Aufenthaltsqualität deutlich verbessern, auch wenn dies mit einem Verlust an Bruttogeschossfläche einhergehen mag. Entscheidend ist hier die Qualität des Raumes und die Förderung der Interaktion zwischen Lernenden und Lehrenden sowie zwischen Innen- und Außenraum.

Drittens sollen neue qualitative Gemeinschaftsflächen

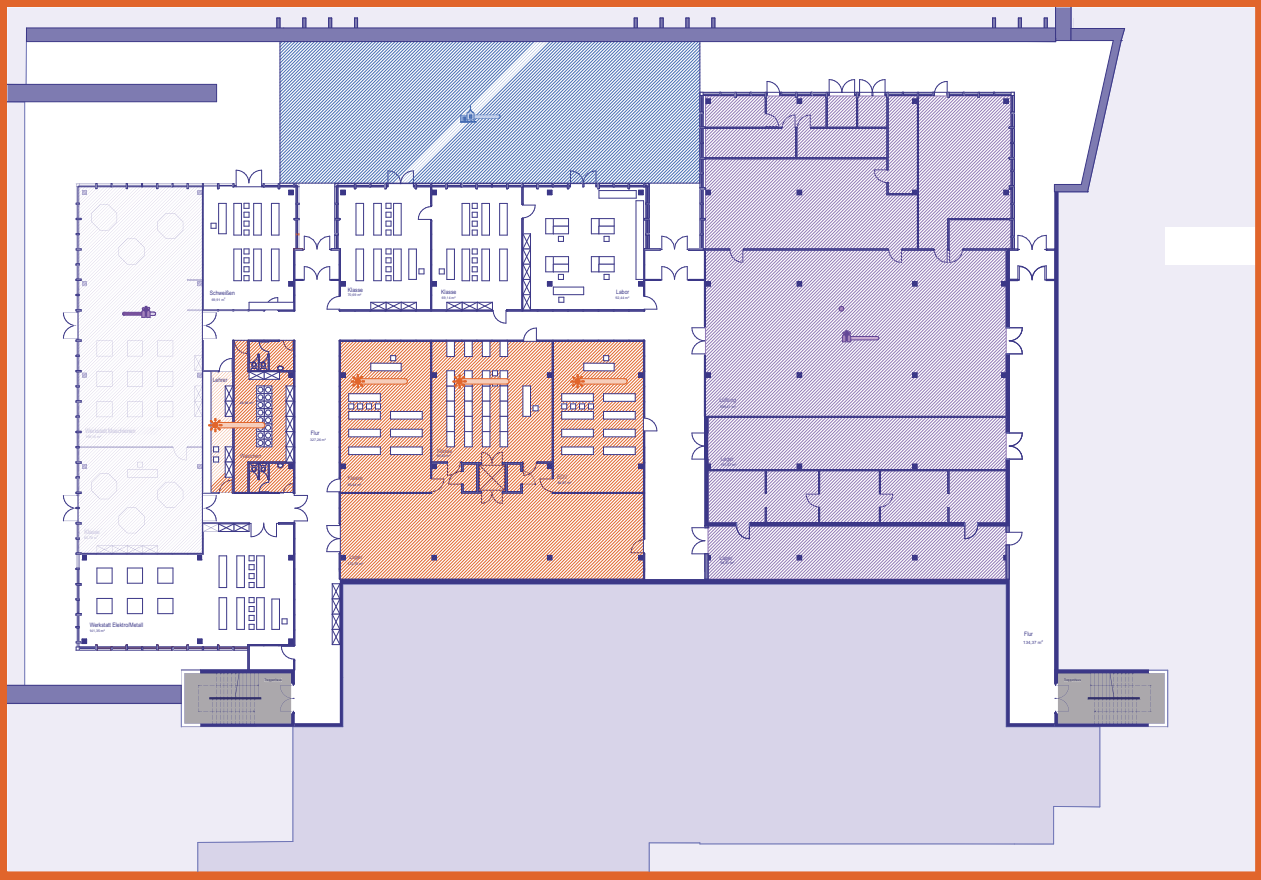


Abb. 67: Mängel- und Potenzialplan UG maßstabslos

geschaffen werden – sowohl im Gebäudeinneren als auch im Außenraum. Ziel ist es, neue Nutzergruppen zu aktivieren und Räume zu schaffen, die auch außerhalb der klassischen Schulzeiten offen und nutzbar sind. Besonders durch eine stärkere Einbindung des Grünraums lässt sich die Attraktivität des Standorts innerhalb des FFB-Geländes wie auch im städtischen Umfeld steigern.

Viertens eröffnet die massive Stahlbetonstruktur des Gebäudes auch Möglichkeiten zur Aufstockung und Erweiterung. Diese konstruktive Reserve kann genutzt werden, um zukünftige Bedarfe – etwa durch veränderte pädagogische Konzepte oder wachsende Schülerzahlen – adaptiv zu beantworten. Im Sinne zirkulärer und adaptiver Planung sind also auch additive Maßnahmen Teil des Lösungsraums.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Analyse des FFB IV deutlich macht, wie stark die Potenziale und Her-

ausforderungen ineinandergreifen. Es geht um die Transformation des Ortes durch gezielte Subtraktionen und Additionen, eine durchdachte Materialwahl und die Wiederbelebung von Raumqualitäten. Die Leitziele lauten daher: Adaptivität, verstanden als Fähigkeit zur Transformation über Zeit und Nutzung; Zirkularität, als Grundlage für eine nachhaltige, materialbewusste Bauweise; und Orientierung am Schichtenmodell von Stewart Brand, welches die zeitliche Staffelung und Austauschbarkeit von Bauteilschichten in einem langlebigen Gebäudesystem thematisiert.

5.2 Entwicklung des Workflows zur Erfassung eines Bestandsgebäudes und Entwicklung eines zirkulären, adaptiven Konzepts

Ausgehend von den identifizierten Potenzialen und Defiziten der bestehenden Gebäudestruktur sowie den übergeordneten Leitzielen der Adaptivität und Zirkularität, wurde ein spezifischer Workflow entwickelt, der sowohl auf die Anforderungen des zirkulären Bauens im Bestand als auch auf die Möglichkeiten adaptiver Architekturkonzepte eingeht. Die zentrale Herausforderung bestand dabei nicht primär in der funktionalen Umnutzung, da diese sich im Fall des analysierten Schulgebäudes weitgehend innerhalb der bestehenden Struktur umsetzen lässt, da Nutzung und Tragwerk grundsätzlich gut aufeinander abgestimmt sind. Vielmehr stellte sich die Frage, wie ein zirkuläres Planungsverständnis systematisch in den frühen Leistungsphasen verankert werden kann, um den Planungsprozess nicht nur qualitativ, sondern auch ökologisch zukunftsfähig zu gestalten.

In der gängigen Planungspraxis setzt der Prozess in der Regel mit der klassischen Grundlagenermittlung ein und es werden zunächst funktionale Anforderungen und grundlegende Rahmenbedingungen erfasst. Im Kontext des zirkulären Bauens reicht dieser Ansatz jedoch nicht aus: Bereits zu diesem frühen Zeitpunkt müssen zentrale Entscheidungen getroffen werden, die über die spä-

tere Rückbaubarkeit, Wiederverwertbarkeit und Materialtrennung maßgeblich mitentscheiden. Es geht um nichts Geringeres als darum, in der frühen Analysephase einen gestalterisch-strukturellen „roten Faden“ zu entwickeln, der über die reine Nutzungsqualität hinaus auch zirkuläre Qualitäten mitdenkt.

Ein wesentliches Instrument zur methodischen Unterstützung in diesem Prozess stellt das digitale Tool Concular dar. Dieses Online-Tool bietet bereits in frühen Planungsphasen die Möglichkeit, Entwürfe in Form einfacher Kubaturen oder Bauteilstrukturen hochzuladen und in einer Grobanalyse zu bewerten. Damit wird der Planende unmittelbar mit zentralen Themen der Zirkularität konfrontiert: Materialwahl, Wiederverwendbarkeit, Recyclingpotenziale und CO_2-Bilanzen werden von Anfang an mitgedacht. Die browserbasierte Anwendung ermöglicht zudem eine erste Quantifizierung über sogenannte Daumenwerte, was die Sensibilisierung für ökologische Kennwerte unterstützt.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein prototypischer Workflow entwickelt, der sowohl die Planung dreier exemplarischer Nutzungsszenarien als auch die Anwendung des Tools Concular in unterschiedlichen Planungsstadien umfasst. Ziel war es nicht nur, die Potenziale eines solchen Workflows im Bestand auszuloten, sondern zugleich auch dessen Grenzen und Optimierungsbedarfe sichtbar zu machen. Besonders mit Blick auf großmaßstäbliche, nicht wohnwirtschaftlich genutzte Bestandsgebäude wie das untersuchte Schulgebäude konnte so ein methodisch fundiertes Vorgehen entwickelt werden, das sich direkt auf die Grundlagenermittlung anwenden lässt.

Zunächst erfolgte eine detaillierte Bestandserfassung. Hierzu wurde ein BIM-Modell erstellt, in dem die verschiedenen Bauteilschichten und -ebenen strukturiert dokumentiert wurden. Dieses digitale Modell bildete die Grundlage für die nachfolgende Verknüpfung mit Concular, wobei u. a. Datensätze aus der ÖKOBAUDATein-bezogen wurden. Auf Basis der erfassten Bauteilmassen konnte das Modell grob bilanziert und hinsichtlich seiner

Materialstruktur analysiert werden. Gleichzeitig wurde die parallele Entwurfsentwicklung genutzt, um einzelne Bauteile gezielt zu optimieren und dabei zirkuläre Prinzipien etwa Trennbarkeit, Wiederverwendbarkeit oder Recyclingfähigkeit methodisch zu integrieren.

Im weiteren Verlauf entstanden drei konkrete Nutzungsszenarien, die jeweils als BIM-Modelle abgebildet und über Concular systematisch analysiert wurden. Ergänzend wurde eine manuelle Auswertungsschleife über Excel eingeführt, um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Ergebnisse weiter zu verbessern. Diese Erweiterung diente insbesondere dazu, eine vergleichende Bewertung mit weiteren Indikatoren wie dem Urban Mining Index (UMI)zu ermöglichen. Obwohl dieser Index ursprünglich für Neubauten entwickelt wurde, konnte er zur kritischen Ergänzung herangezogen werden, da er wertvolle Hinweise auf die Rückbau- und Wiederverwertungspotenziale einzelner Bauteile liefert.

Besonders deutlich wurde in der Auswertung, dass der Fokus auf Bestandsmaterialien sowohl in ihrer direkten Wiederverwendung als auch in aufbereiteter, recycelter Form noch stärker herausgearbeitet werden muss. Das betrifft nicht nur die technische Analyse, sondern auch die kommunikative Vermittlung der Ergebnisse. Daher wurde im Rahmen der Excel-Auswertung eine zusätzliche Deutungsebene ergänzt, die es ermöglicht, die Daten nicht nur technisch, sondern auch verständlich für Bauherr:innen und Entscheidungsträger:innen aufzubereiten.

Denn letztlich müssen nicht nur Planende, sondern auch Auftraggeber:innen überzeugt werden und zwar von der Wirtschaftlichkeit sowie vom ökologischen Mehrwert zirkulärer Planung. Die Frage nach der Vermittlung spielt eine entscheidende Rolle: Wie gelingt es, den mitunter aufwendig erscheinenden Planungsansatz so zu strukturieren, dass er als pragmatisch, effektiv und zielführend wahrgenommen wird?

Diese Untersuchung verfolgte daher auch das Ziel, Hand-

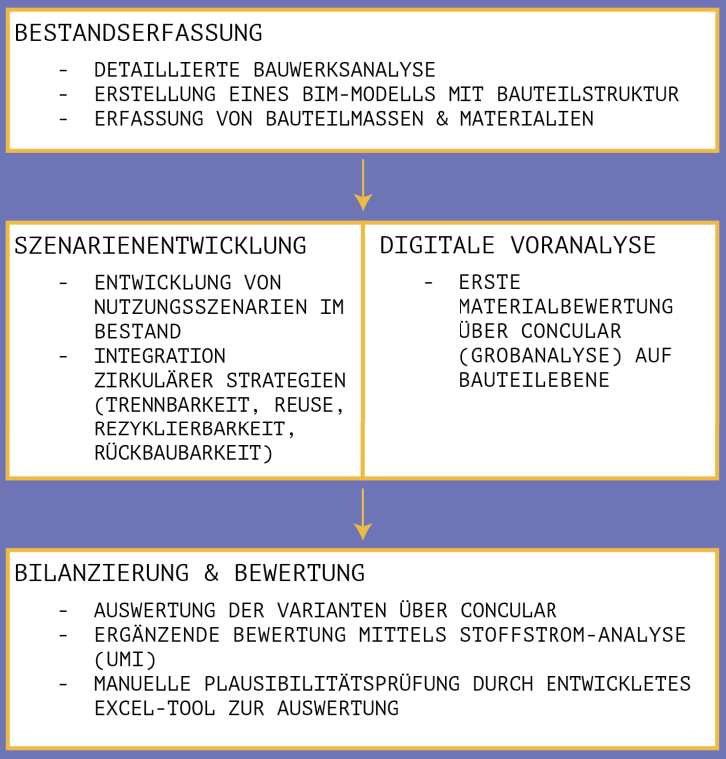


Abb. 68: Workflow zur Entwicklung von adaptiven, zirkulären Entwurfsszenarien

lungsoptionen aufzuzeigen: Wo laufen digitale Tools wie Concular reibungslos? Wo zeigen sich Brüche oder Lücken in der Informationskette? Und an welchen Stellschrauben kann konkret gedreht werden, um die Nutzung solcher Werkzeuge im frühen Planungsstadium zu erleichtern und nicht als zusätzliche Hürde, sondern als integrativen Bestandteil einer nachhaltigen, zukunftsgerichteten Architekturentwicklung?

Der entwickelte Workflow zeigt somit exemplarisch, wie sich zirkuläres und adaptives Planen bereits in der Frühphase des Entwurfsprozesses operationalisieren lässt – und wie digitale Methoden dazu beitragen können, nicht nur ökologische Kennzahlen zu erheben, sondern echte Entwurfsqualität zu generieren. Die Kombination aus BIM-basierter Bestandserfassung, digitaler Materialbilanzierung, szenarienbasierter Entwurfsentwicklung und manuell ergänzter Deutung der Ergebnisse ermöglicht ein umfassendes Planungsinstrumentarium, das in künftigen Projekten weiterverwendet und verfeinert werden kann.

5.2.1 Arbeit mit Concular im Planungsprozess

Ausgehend von der Entwicklung und Anwendung eines zirkulären und adaptiven Workflows wurde in einem nächsten Schritt die digitale Erfassung und Analyse des Bestandsgebäudes vertieft. Im Zentrum stand hierbei die Nutzung der Software Concular in Kombination mit einem BIM-basierten IFC-Modell, um eine fundierte Bewertung hinsichtlich Materialkreisläufen, Wiederverwendbarkeit und ökologischen Kennwerten vornehmen zu können.

Der Einstieg in die Arbeit mit Concular beginnt mit einer umfassenden Erfassung aller im Gebäude vorhandenen Bauteile und Materialien. Diese kann entweder manuell über eine Begehung erfolgen oder digital, insbesondere durch ein strukturiertes BIM-Modell, das sämtliche relevanten Informationen zu Bauteilschichten, Materialien, Mengen, Zuständen und Wiederverwendbarkeit bereithält. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein solches BIM-Modell in Archicad entwickelt und als IFC-Datei exportiert. Die Entscheidung für Archicad fiel nicht nur aufgrund der hohen Kompatibilität mit Concular, sondern auch wegen der umfangreichen Dokumentationen und Hilfestellungen, die Concular für Archicad-User bereitstellt (Concular für Planende, 2025).

Für einen reibungslosen Import in die Concular-Plattform müssen bestimmte Anforderungen an die semantische Modellstruktur erfüllt sein. Zentrale Informationsbereiche sind dabei:

- IFC Materials, zur präzisen Erfassung der Materialität (auch bei mehrschichtigen Aufbauten),
- Base Quantities, zur Massenermittlung,
- Common Properties, für ergänzende Angaben wie Lage, Funktion oder Tragverhalten,
- sowie der spezifische Property Set „PSet_Concular“, der zusätzliche Parameter wie Trennbarkeit (Separability), Wiederverwendbarkeit (Reusability), Rück-

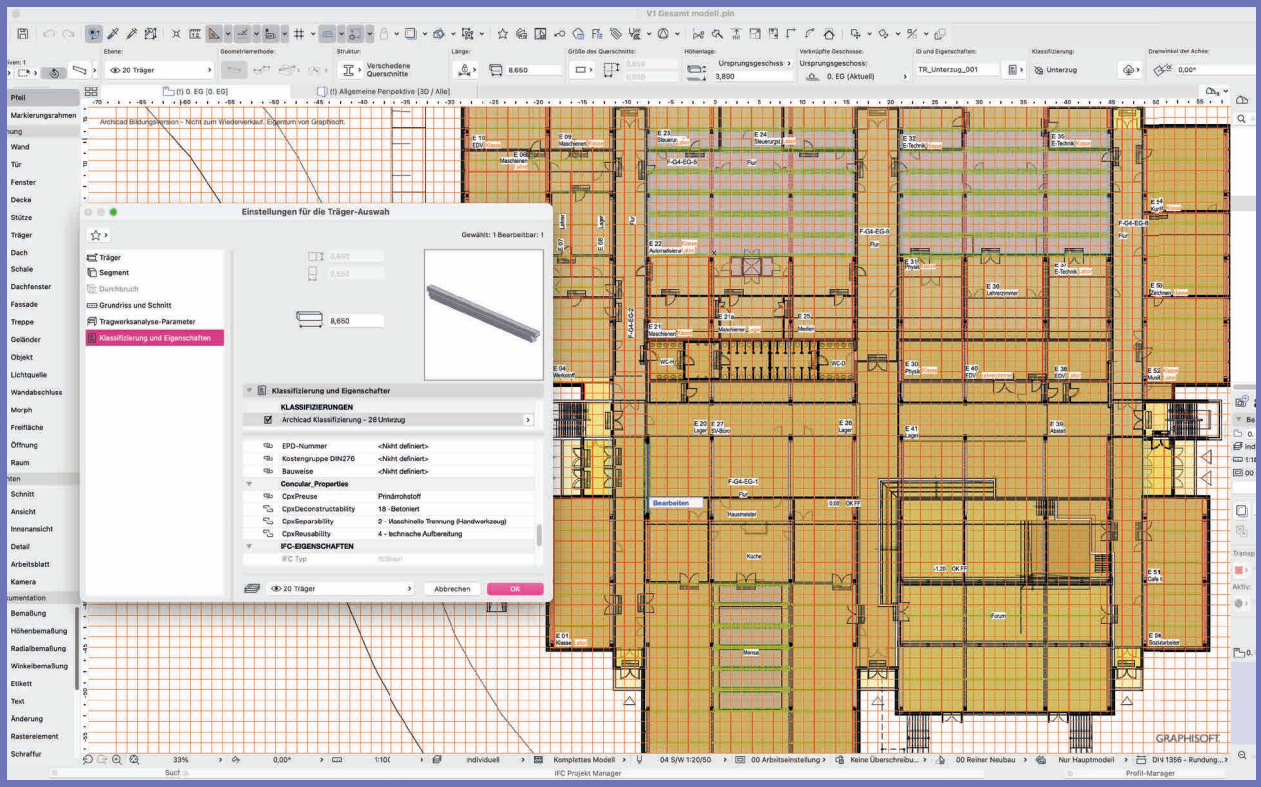


Abb. 69: Arbeitsmaske in Archicad und CPX Tools beim BIM-Manager

baubarkeit (Deconstructability) und Vorbereitung zur Wiederverwendung (Preuse) enthält.

Besonders wichtig ist zudem die Eigenschaft „Status“ oder „Phase“, über die der Materialfluss deklariert wird. Hier wird zwischen folgenden Zuständen unterschieden:

- Temporary (temporär verwendet),
- Demolish (zum Rückbau vorgesehen),
- Existing (im Bestand verbleibend),
- New (neu zu errichten).

Diese Information ist entscheidend für die zirkuläre Bewertung, da sie festlegt, ob ein Bauteil erhalten, rückgebaut oder neu eingebaut werden soll – eine wesentliche Grundlage für die spätere Ökobilanzierung.

Nach dem erfolgreichen Upload des Modells erfolgt in Concular die automatische Verknüpfung mit passenden EPD-Datensätzen (Environmental Product Declarations), wie sie z. B. in der ÖKOBAUDAT, bei EPD Norge oder im

Rahmen der QNG-Rechenwerte hinterlegt sind. Auch gemischte oder mehrschichtige Bauteile können über die Auswahl mehrerer EPDs differenziert bilanziert werden. Die Lebensdauern der Materialien orientieren sich an Referenzwerten aus dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) oder internationalen Studien. Änderungen in den Datensätzen werden dynamisch angezeigt, sodass der Planende auf Aktualisierungen hingewiesen wird und bestehende Zuordnungen bei Bedarf anpassen kann (Notion Site Concular, 2025).

Die Analyse der erfassten Gebäudedaten erfolgt in Concular über verschiedene Reiter mit spezifischen Auswertungen. Im zentralen Dashboard werden grundlegende Kennzahlen wie der Circularity Performance Index (CPX), die CO_2-Einsparungspotenziale, Materialmengen und ökologische Auswirkungen visualisiert. Im Bereich „Inventar“ ist eine detaillierte Übersicht über alle importierten Bauteile samt ihrer hinterlegten Informationen einsehbar. Hier können zwar keine Änderungen n etwa zur Bauteilgeometrie, Materialschichtung oder der Pre und

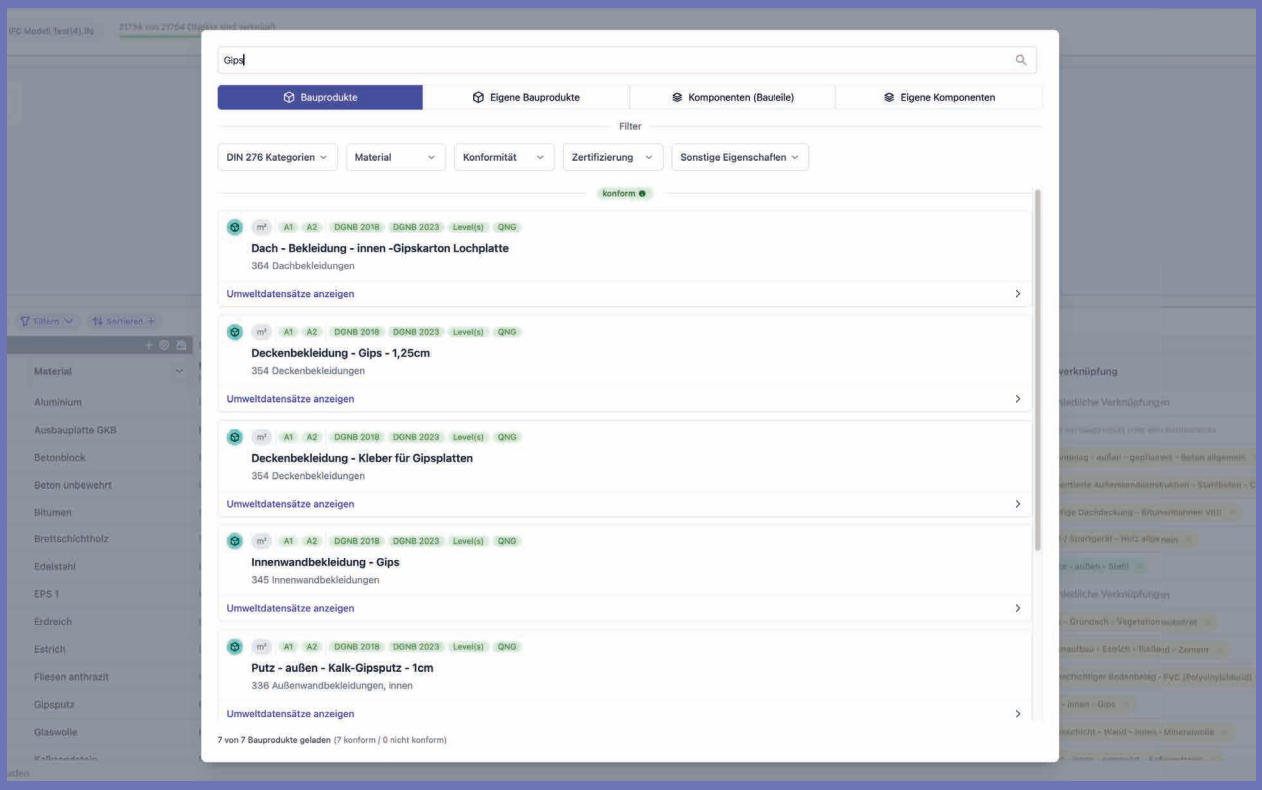


Abb. 70: Arbeitsmaske Concular bei der Verknüpfung von EPD Datensätzen

Post Use Kriterien direkt vorgenommen werde, jedoch lassen sich EPD-Zuweisungen nachträglich anpassen. Sämtliche strukturellen Änderungen am Modell selbst müssen hingegen im ursprünglichen BIM-Modell erfolgen und anschließend erneut als IFC-Datei hochgeladen werden (Concular für Planende, 2025).

Im Reiter „Analyse“ stehen tiefgreifende Auswertungen zur Verfügung, die nicht nur die Zirkularität jedes einzelnen Bauteils bewerten, sondern auch Aussagen zur Material- und Energieeffizienz, Ressourcennutzung, Datenqualitätsowie zum ökologischen Fußabdruck der Konstruktionen erlauben. Darüber hinaus können verschiedene Planungsvarianten miteinander verglichen werden, um die ressourceneffizienteste Lösung zu identifizieren (Concular für Planende, 2025).

Ein weiteres Modul innerhalb von Concular ist der Bereich „Audit & Materialverkauf“, in dem erfasste Materialien an potenzielle Wiederverwendungsnetzwerke – etwa Rückbauunternehmen, Händler oder Re-use-Initiativen – ver-

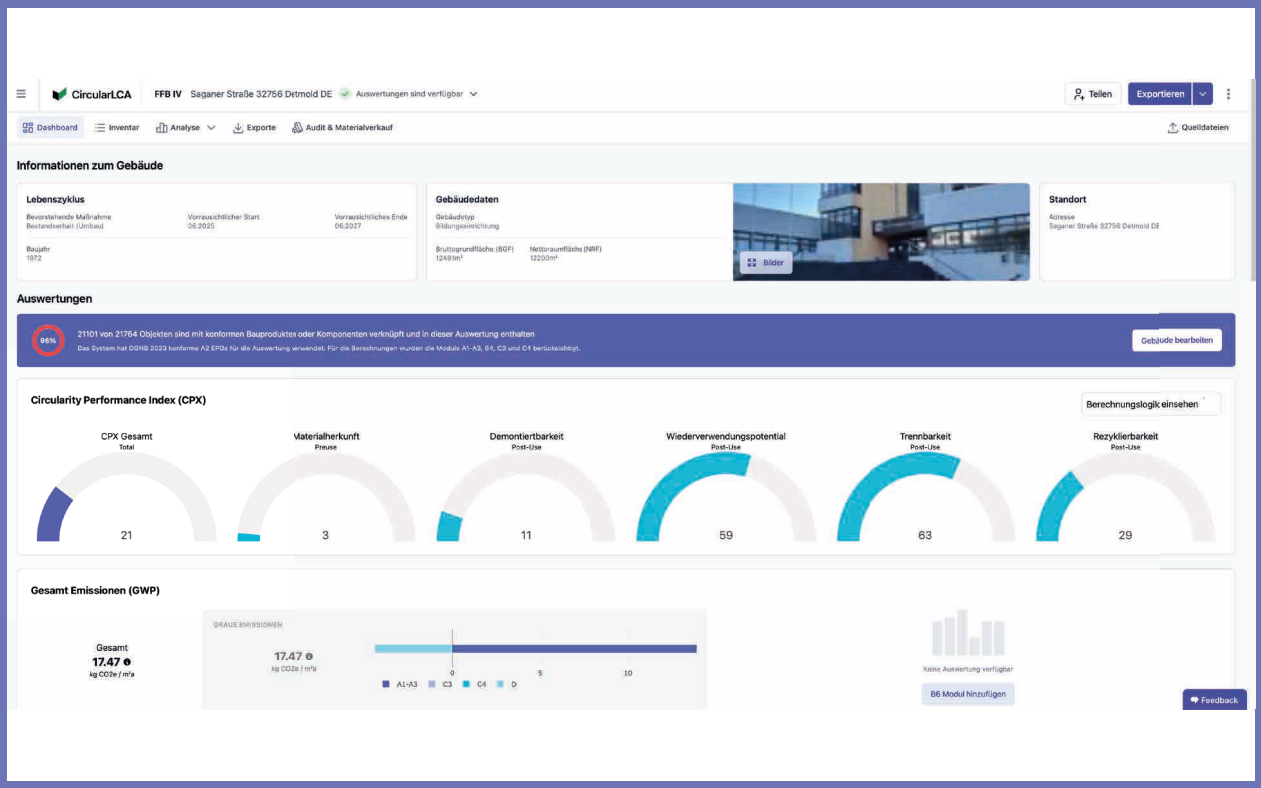


Abb. 71: Dashboard des Concular Tools

mittelt werden können. Diese Funktion dient vorrangig der Marktrecherche; eine direkte Verknüpfung mit Bauteilen aus dem IFC-Modell ist derzeit nicht vorgesehen (Concular für Planende, 2025).

Von besonderem Interesse ist zudem die Berechnung des Materialrestwerts, die Concular als finanziellen Indikator zur Werterhaltung von verbauten Materialien anbietet. Der Wert ergibt sich aus der Multiplikation des aktuellen Marktpreises beispielsweise auf Rezyklatbasis oder Börsenniveau mit der verbauten Materialmenge, die aus der Modellierung übernommen wird. Die Preisbasis stammt aus einer Concular-internen Datenbank, die regelmäßig mit quartalsaktuellen Werten oder Listenpreisen verschiedener Anbieter aktualisiert wird. In einer zukünftigen Entwicklungsstufe soll auch der Rückbauaufwand in die Berechnung aufgenommen werden, um potenzielle Verwertungserlöse präziser ausweisen zu können (Concular für Planende, 2025).

Abschließend bietet Concular die Möglichkeit, sämtliche Auswertungsergebnisse in verschiedenen Formaten zu exportieren. Dazu gehören:

- Der Gebäuderessourcenpass, inklusive Materialübersicht, CO_2-Bilanz und Zirkularitätsbewertung,
- Eine vollständige Ökobilanz gemäß gängiger Zertifizierungssysteme,
- Sowie ein detailliertes Bauteilinventar.

Diese Unterlagen stellen nicht nur eine umfassende Planungs- und Entscheidungsgrundlage für Architekt:innen, sondern auch eine belastbare Dokumentation für Bauherr:innen und Zertifizierungsprozesse dar. Die Anwendung von Concular innerhalb des vorgestellten Workflows zeigt damit auf, wie sich digitale Werkzeuge frühzeitig und präzise zur Entwicklung zirkulärer Strategien einsetzen lassen und nicht als ergänzende Option, sondern als integraler Bestandteil eines ganzheitlich nachhaltigen Planungsverständnisses.

5.2.2 Bewertung der Arbeit mit Concular Pro und Cons der Dateneinpflegung und -herausgabe in Concular

Die Anwendung von Concular im Zusammenspiel mit einem strukturiert aufgebauten BIM-Modell bietet grundsätzlich einen gut integrierbaren und intuitiv nutzbaren Workflow. Besonders positiv hervorzuheben ist die fortlaufende Aktualisierung der zugrunde liegenden EPD-Datensätze: Sobald sich Änderungen ergeben, wird der Planende im Interface darauf hingewiesen und kann entsprechende Aktualisierungen manuell vornehmen. In dieser Phase ist zudem eine nachträgliche Anpassung des „Status“ bzw. der Einbauphase eines Bauteils möglich, also ob es neu eingebaut, rückgebaut, temporär verwendet oder im Bestand verbleibt. Da dieser Parameter direkten Einfluss auf die Bewertung der Kreislauffähigkeit und der Umweltwirkungen nimmt, ist diese nachträgliche Bearbeitbarkeit im Planungsprozess als klarer Vorteil zu werten.

Die eigentliche Verknüpfung der BIM-Bauteile mit den zugehörigen EPDs kann manuell erfolgen oder durch ein KI-gestütztes Vorschlagssystem. Letzteres ist jedoch mit Vorsicht zu nutzen. In mehreren Stichproben ergaben sich fehlerhafte Zuweisungen beispielsweise die Kombination von Holzfaserdämmung mit einem Stahlbetonträger , die in ihrer Gesamtheit schwer zu kontrollieren und zeitaufwändig zu korrigieren sind. Gerade in einem komplexen Bestandsgebäude wie dem analysierten Schulbau ist die Fehleranfälligkeit des KI-Vorschlags zu hoch, um effizient nutzbar zu sein. Die Weiterentwicklung dieses Tools wäre zwar vielversprechend, bleibt in der aktuellen Fassung jedoch eine potenziell hinderliche Komponente im Arbeitsprozess.

Ein signifikanter Nachteil zeigt sich bei der dynamischen Anpassung von Bauteileigenschaften innerhalb des Tools: Änderungen an Bauteilschichtungen oder Konstruktionsweisen unteranderem zur Erhöhung der Demontierbarkeit oder zur Variation von Materialverbindungen können ausschließlich über das BIM-Modell vorgenommen werden. Dies erfordert stets eine Rückkopplung zu Archicad, den erneuten Export einer aktu-

alisierten IFC-Datei und die Re-Integration in Concular. Der iterative, explorative Entwurfsprozess wird dadurch unnötig verlangsamt. Ein exemplarischer Fall: Soll untersucht werden, welche Auswirkungen es hat, ob Ziegel gemörtelt oder trocken gestapelt verbaut sind, muss jede dieser Varianten im BIM-Modell neu modelliert und einzeln in Concular analysiert werden. Eine spontane, explorative Vergleichbarkeit durch eine einfache, spontane Materialumschaltung ist nicht gegeben.

Gleiches gilt für kombinierte Materialschichtungen. Wenn eine Ziegelwand beispielsweise zusätzlich mit einer Dampfbremse ausgestattet werden soll, die einmal kraftschlüssig und einmal mechanisch befestigt ist, muss diese Entwurfsentscheidung ebenfalls außerhalb von Concular simuliert werden. Gerade in frühen Planungsphasen, in denen kreative Lösungsansätze für zirkuläres Bauen entwickelt werden sollen, wirkt diese methodische Starrheit hemmend – sowohl hinsichtlich der gestalterischen Freiheit als auch der Analysegeschwindigkeit. In diesem Punkt wird das Potenzial des BIM-Modells nicht ausgeschöpft.

Ein weiteres Analyseproblem ergibt sich bei der Bewertung von Rezyklatanteilen. Zwar werden bei der automatischen EPD-Zuweisung Standardwerte zur Wiederverwertbarkeit hinterlegt, diese basieren jedoch auf statistischen Durchschnittswerten, etwa aus der Abfallstatistik von 2018. Eine dynamische Anpassung – etwa unter Annahme technologischer Fortschritte oder lokal erhöhter Recyclingquoten – ist nur möglich, wenn man ein komplett neues Bauteil manuell erstellt. Dies ist zwar grundsätzlich möglich, aber aufwendig und wenig praktikabel im iterativen Vergleich. Für zukünftige Entwicklungen wäre eine flexible Anpassung dieses Wertes – auch innerhalb eines bestehenden Bauteils – wünschenswert.

Ergebnisausgabe und Bewertungsstruktur

In der Ergebnisausgabe stellt Concular im zentralen Dashboard zunächst aggregierte Kennzahlen bereit. Der Circularity Performance Index (CPX) sowie CO_2-Werte und Materialmengen werden sowohl auf Gesamtgebäudeebene als auch nach Kostengruppen dargestellt. Besonders vorteilhaft ist die Möglichkeit, die Zirkularitätsbe-

wertung nach Kostengruppen auszuwerten, was gezielt aufzeigt, in welchen Bereichen die größten Defizite oder Potenziale bestehen.

Problematisch wird es jedoch auf der Material- und Bauteilebene. Sobald ein niedriger CPX-Wert für eine bestimmte Kostengruppe (z. B. Beton) identifiziert wurde, wird nicht transparent, welche spezifischen Bauteile oder Materialien zur Schwäche dieses Werts beigetragen haben. Es fehlt eine differenzierte Aufschlüsselung in Pre-Use und Post-Use-Anteile. Diese Trennung müsste gegeben sein, um gezielt Anpassungen an Entwurf oder Materialwahl vorzunehmen. Derzeit bleibt nur der manuelle Rückgriff auf das Inventar, jedoch ohne Filterfunktion, was den Workflow erheblich verlangsamt.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die visuelle Darstellung: Die Kreislaufanteile in Pre- und Post-Use werden zwar über getrennte Kreisdiagramme angezeigt, jedoch fehlt eine visuelle Verknüpfung, die den Zusammenhang zum Gesamt-CPX klar verständlich macht. Unterschiedliche

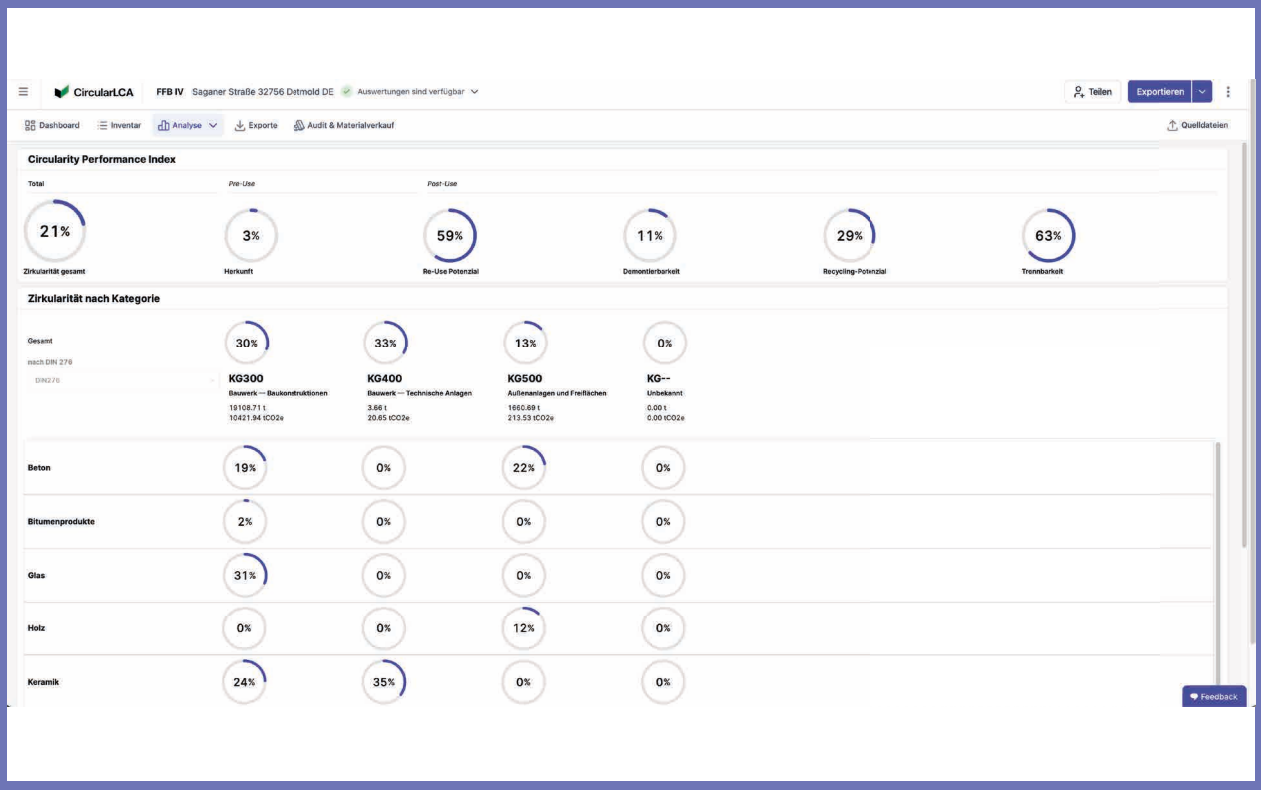


Abb. 72: Analysebereich zu den CPX-Ergebnissen

Farben, überlagerte Diagramme oder interaktive Darstellungen könnten hier zur Verbesserung beitragen. In der aktuellen Form fällt es schwer, gestalterische Entscheidungen direkt auf Ergebnisse zurückzuführen.

Bewertung der GWP-Analyse

Die Ausgabe der Global Warming Potential-Werte (GWP) stellt einen zentralen Bestandteil der Ökobilanzierung in Concular dar. Diese Werte werden im Dashboard in drei Einheiten angezeigt:

- $kgCO_2e$ (Gesamtwert)
- $kgCO_2e/m^2$ (flächenbezogen)
- $kgCO_2e/m^2a$ (flächen- und zeitbezogen, z. B. über 50 Jahre)

Diese differenzierte Darstellung ermöglicht grundsätzlich eine gute Vergleichbarkeit, wie etwa mit nationalen oder internationalen Zertifizierungszielen wie QNG, DGNB oder der EU-Taxonomie. Problematisch ist jedoch, dass beim Excel-Export lediglich der absolute Gesamtwert in

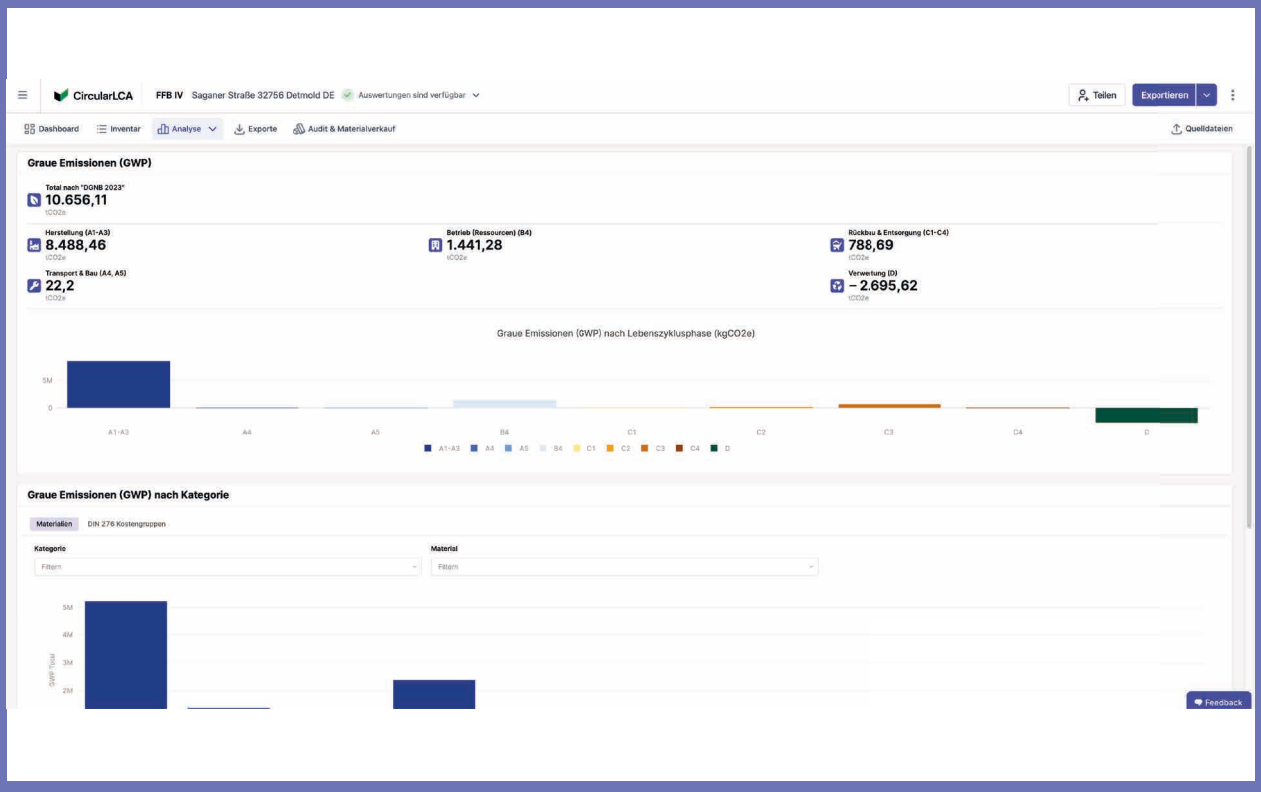


Abb. 73:
Analysebereich zu den Massen

kgCO_2e exportiert wird. Die anderen beiden Einheiten, die für die Planung und Zertifizierung oft entscheidend sind, müssen manuell berechnet werden. Das erschwert die Weiterverarbeitung und Analyse erheblich, insbesondere wenn Planende Vergleichsdiagramme oder Zwischenstände dokumentieren wollen. Die Information ist zwar auf dem Dashboard vorhanden, kann aber nur temporär abgelesen werden (z. B. beim Mouse-over-Effekt), jedoch nicht als feste, speicherbare Datengrundlage genutzt werden.

Im Bereich Analyse, Umwelteinflüsse ist eine strukturierte Auswertung nach Materialien, Bauteilgruppen oder Kostengruppen möglich. Hier können die GWP-Werte auch im Zusammenhang mit der Bauteilmasse eingesehen werden. Doch auch in diesem Bereich fehlt die Angabe in m²a. Gerade für QNG oder andere Nachhaltigkeitszertifikate, die mit Grenzwerten pro Quadratmeter und Jahr arbeiten, ist diese Information essenziell. Der Workaround besteht aktuell darin, die Inventarliste zu exportieren und in Excel manuell eine Umrechnung auf

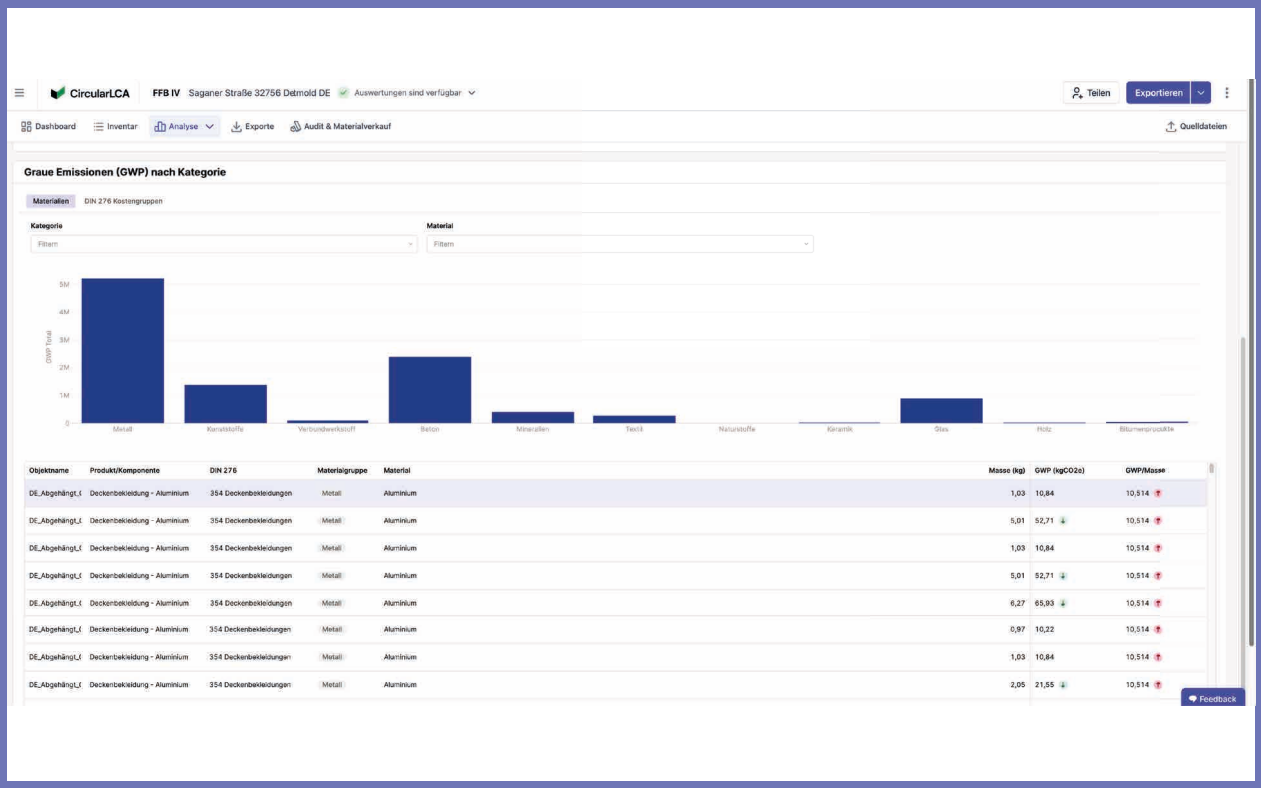


Abb. 74:
Analysebereich zu den Massen



226 Abb. 75: Analysebereich zu den GWP Werten

Gebäudegrundfläche und Planungszeitraum durchzuführen. Das ist zwar grundsätzlich machbar, bedeutet aber einen erhöhten Arbeitsaufwand, der die Effizienz des digitalen Planens einschränkt. Hier wäre eine automatische Umrechnung im Tool oder ein Auswahlmenü zur gewünschten Ausgabeeinheit dringend wünschenswert.

Bewertung der Masse-Analyse

In Concular kann das Massenaufkommen der verbauten Materialien nach verschiedenen Dimensionen differenziert werden. Die Plattform erlaubt die Anzeige in:

- kg (Kilogramm)
- kg/m² (flächenbezogen)
- t (Tonnen)

Dies ermöglicht auf den ersten Blick eine gute Übersicht über Materialflüsse – insbesondere auf Material- oder Kostengruppenebene. Für die weiterführende Verarbeitung der Daten ergeben sich jedoch Einschränkungen:

Beim Datenexport in Excel werden die Materialmengen nur in der Einheit kg (Kilogramm) ausgegeben. Angaben in kg/m²oder t müssen nachträglich händisch ergänzt werden. Gerade bei der Analyse von Materialeffizienz (Materialeinsatz pro m²) oder zur Berechnung von Transportaufwand (in t) ist dies eine unnötige Hürde.
Hinzu kommt ein weiterer relevanter Aspekt: Die im Hintergrund angenommenen Rohdichtewerte der Materialien, die zur Umrechnung der Volumen- in Masseangaben genutzt werden, werden im Export nicht transparent gemacht. Für Nutzer:innen, die eine Plausibilitätsprüfung oder eine eigene GWP-Rechnung durchführen möchten, fehlen damit zentrale Referenzwerte. Ebenso wäre eine Rückverfolgbarkeit hilfreich, wie beispielsweise zur genauen Identifikation, ob ein bestimmter Massenwert aus einem leichten Dämmstoff, einem dichten Betonbauteil oder einer Mehrschichtkonstruktion resultiert. Auch hier würde eine klar strukturierte Exportfunktion (inkl. Rohdichte und Einheitsoptionen) die Nutzbarkeit der Daten erheblich verbessern.

Bewertung der Materialwert-Analyse
Ein weiterer Aspekt im Rahmen der zirkulären Bewertung ist die monetäre Quantifizierung der verbauten Materialien. Concular bietet hierzu die Möglichkeit, den Materialwert in Euro auszugeben. Dieser basiert auf aktuellen Börsen- oder Marktwerten sowie Rezyklatpreisen. Die Einteilung erfolgt auf zwei Ebenen:

- nach Materialgruppen (z. B. Holz, Metall, Beton)
- nach Kostengruppen (z. B. Fassade, Tragstruktur, Ausbau)

Grundsätzlich ist es sehr hilfreich, Materialwerte monetär zu bewerten, vor allem insbesondere für die spätere Argumentation gegenüber Bauherr:innen oder Investierenden. Jedoch fehlt im aktuellen System eine flächenbezogene Darstellung des Materialwerts (z. B. €/m²), die im Rahmen entwerferischer Entscheidungen wesentlich aussagekräftiger wäre. So ließe sich etwa erkennen, ob gemessen am Beitrag zur Nachhaltigkeit und zirkulären Wiederverwendung eine kostenintensive, hochwertige

Holzfassade gegenüber einer günstigen Putzlösung vertretbar ist.
Auch die Exportfunktion zum Materialwert ist eingeschränkt. Zwar lassen sich die Gesamtwerte exportieren, jedoch nicht auf Einzelbauteile oder detaillierte Bauteilschichten herunterbrechen. Ebenso fehlt die Möglichkeit, direkt zu erkennen, wie sich der Materialwert in Abhängigkeit zum Rückbauwert oder zur ökologischen Bewertung (z. B. CO_2-Ersparnis) verhält. Eine verknüpfte Bewertung zwischen monetärem und ökologischem Wert etwa als GWP/€ oder €/m²a wäre besonders in der integrativen Planungsphase hilfreich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Concular bereits eine solide Grundlage für die ökologische und zirkuläre Bilanzierung bietet, insbesondere durch die strukturierte Datenerfassung, die aktuelle EPD-Datenbank und das Dashboard mit umfassenden Ergebnisanzeigen. Jedoch offenbaren sich im Bereich der Ergebnisausgabe mehrere kritische Lücken:

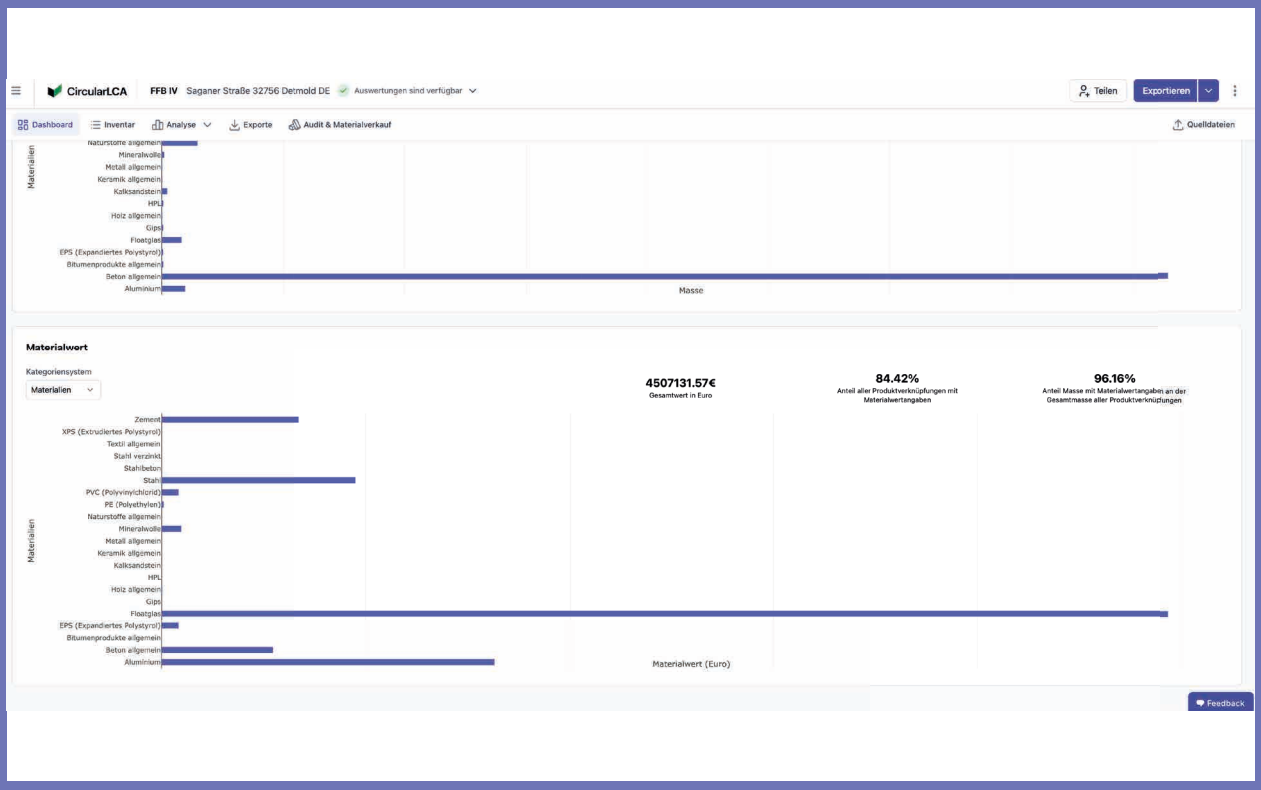


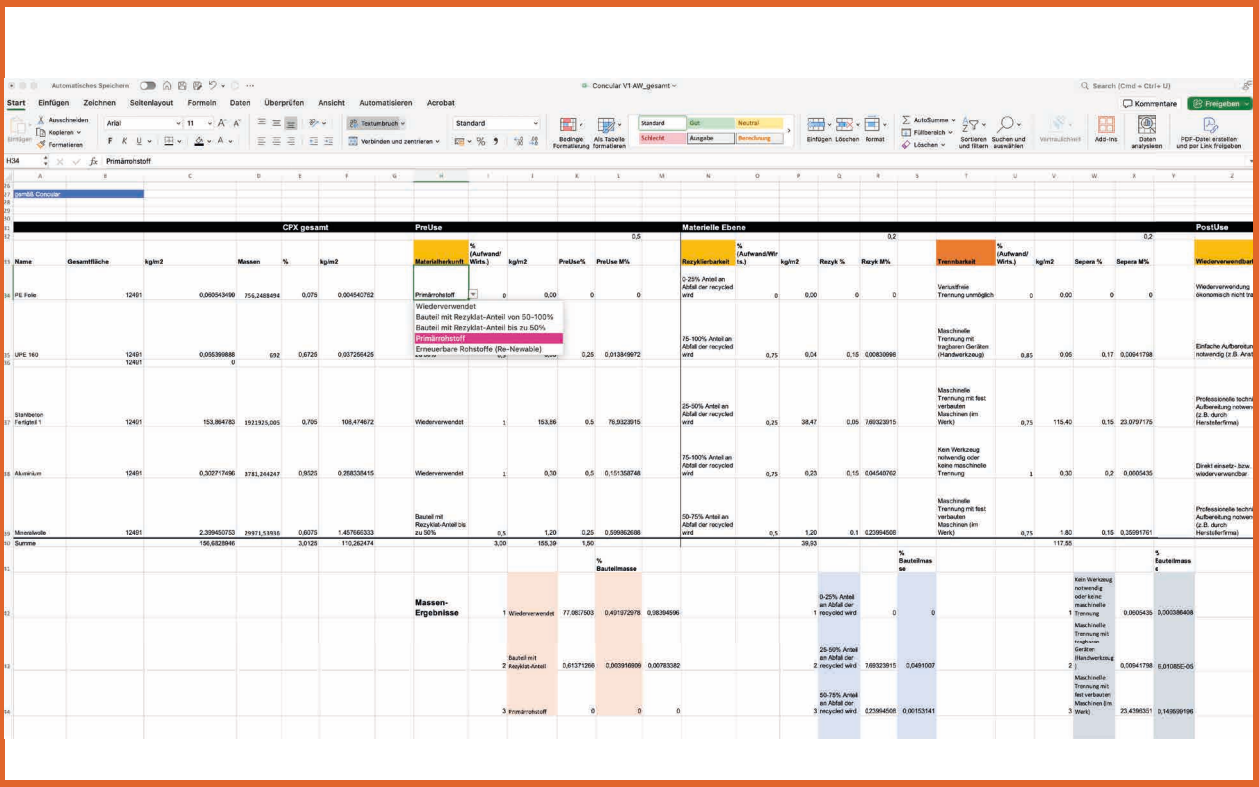
Abb. 76:
Analysebereich zu den Massen

Der Export der Werte ist nicht einheitlich und oft nur in einer einzigen Maßeinheit verfügbar.
Eine direkte Vergleichbarkeit von Bauteilen auf Basis von Pre-/Post-Use, GWP/m²a oder €/m² ist nicht möglich.
Die grafische Darstellung ist an einigen Stellen erklärungsbedürftig und erschwert die schnelle Nachvollziehbarkeit.
Eine Verknüpfung von ökologischen und wirtschaftlichen Kennwerten (z. B. GWP/m² versus €/m²) fehlt gänzlich.

Diese Punkte erschweren eine durchgängige Integration von Concular in explorative, agile Entwurfsprozesse. Für eine zukünftige Weiterentwicklung wäre es daher entscheidend, genau an diesen Schnittstellen nachzuschärfen und sei es durch erweiterte Exportoptionen, interaktive Visualisierungen oder einheitliche Maßeinheiten in der Ausgabe. Nur so lässt sich der Anspruch an eine planungsnahe, nachvollziehbare und handlungsorientierte Ökobilanz im Sinne des zirkulären Bauens auch vollumfänglich einlösen.

5.2.3 Weiterentwicklung des zirkulären Bewertungstools in Excel

Weiterentwicklung im Bereich des Circularity-Indexes
Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zur gezielten Optimierung und zur analytischen Vertiefung der durch Concular generierten Ergebnisse ein eigenständiges, Excel-basiertes Berechnungstool entwickelt. Ziel dieser Erweiterung war es, die im Planungsprozess ermittelten Zirkularitätskennwerte, insbesondere den Circularity Performance Index (CPX), sowie die wesentlichen umweltrelevanten Parameter wie die Massenbilanzierung, die CO_2-Äquivalente (GWP – Global Warming Potential) und die Materialwertanalyse differenzierter, transparenter und zugleich praxisnäher zu erfassen. Ausgangspunkt der Entwicklung war die Beobachtung, dass Concular zwar eine fundierte Bewertung bereitstellt, jedoch in seiner Struktur nicht alle wesentlichen Rückschlüsse für entwerferische Entscheidungen, Variantenvergleiche



230 Abb. 77: Excel Ausschnitt mit Drop-Down Menü im Pre Use Bereich

und kreative Transformationen zulässt.

Zur Behebung dieser Defizite wurde ein tabellarisches Modell in Microsoft Excel erstellt, das die Logik der Bewertungssystematik von Concular systematisch aufgreift, aber zugleich um zahlreiche Zusatzfunktionen ergänzt, die sowohl eine höhere Flexibilität als auch eine feinere Differenzierung der Eingabedaten ermöglichen. Im Zentrum dieses Tools steht die klare Gliederung der Bauteilinformationen: Für jede Bauteilschicht wurden Name, Fläche in Quadratmetern, spezifisches Gewicht (in kg/m²) sowie die resultierende Masse erfasst. Diese Basisdaten bilden die Grundlage für sämtliche Berechnungsprozesse zur Pre- und Post-Use-Bewertung.

Im Pre-Use-Bereich wurde eine Auswahlstruktur entwickelt, in der zwischen vier Materialquellen differenziert wird: Primärrohstoff, Bauteil mit Rezyklatanteil (in zwei Abstufungen) sowie wiederverwendete Bauteile. Über ein Dropdown-Menü kann für jede Schicht eine der Materialherkünfte gewählt werden, woraufhin auto-

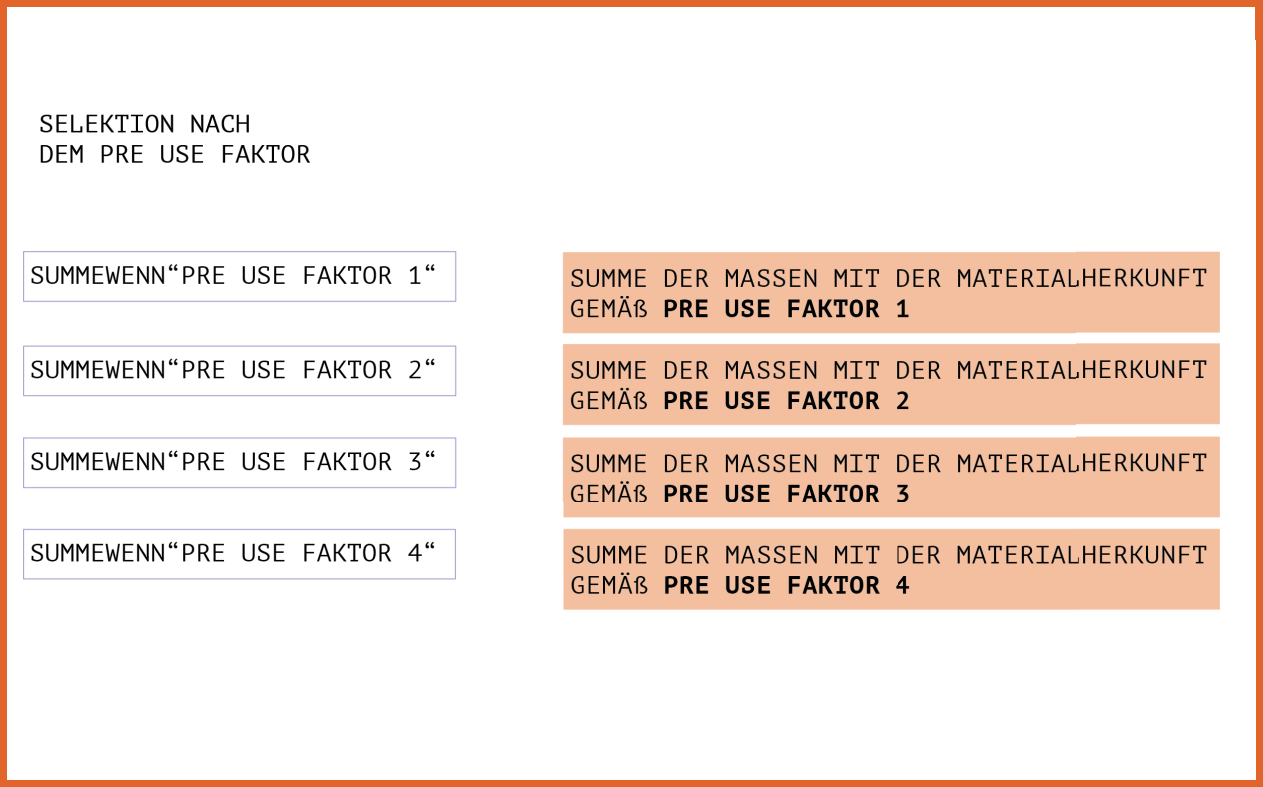
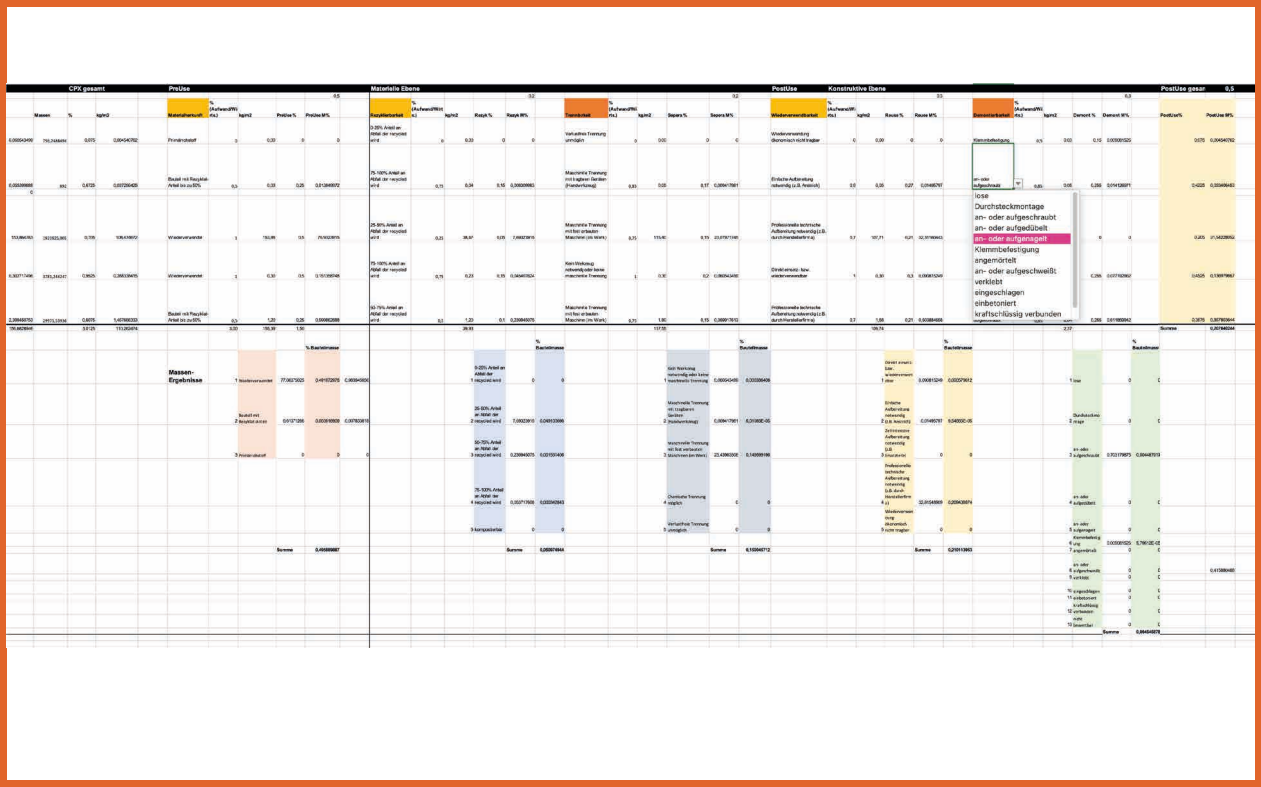


Abb. 78: Prinzipdarstellung der SUMMEWENN Funktion

matisch ein zugeordneter Bewertungsfaktor (z. B. 1,0 für „wiederverwendet“, 0,75 oder 0,5 für Rezyklatanteile, 0,5 für Primärrohstoffe) hinterlegt wird. Diese Faktoren basieren auf der von Concular übernommenen Systematik und wurden mit normativen Bezugsgrößen aus dem DGNB-System sowie dem Urban Mining Index (UMI) abgeglichen. Die Multiplikation des Faktors mit der jeweiligen Masse der Bauteilschicht ergibt den prozentualen Pre-Use-Anteil, der in die Gesamtbewertung einfließt. Zusätzlich wird dieser Wert standardisiert mit dem Faktor 0,5 multipliziert, da Pre- und Post-Use in der CPX-Gesamtbewertung gleich gewichtet sind.

Parallel wurde eine aggregierende Auswertung via „SUMMEWENN“-Funktion programmiert, mit der sich die Masseanteile jeder Materialkategorie (z. B. „wiederverwendet“) automatisch summieren lassen. Dies erlaubt es, die Herkunft der Materialien auch grafisch zum Beispiel in Kreisdiagrammen differenziert darzustellen und den Anteil einzelner Entscheidungen an der Gesamtzirkularität direkt zu visualisieren. Der entwerferische Mehrwert liegt



232 Abb. 79: Excel Ausschnitt mit Drop-Down Menü im Post Use Bereich

dabei insbesondere darin, dass diese Visualisierung eine Rückkopplung zur Materialwahl in Echtzeit ermöglicht: Planende können unmittelbar erkennen, welche Materialentscheidungen für das Zirkularitätsergebnis verantwortlich sind.

Analog dazu wurde der Post-Use-Bereich auf Grundlage von vier zentralen zirkularitätsrelevanten Eigenschaften aufgebaut: Rezyklierbarkeit, Trennbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Demontierbarkeit. Auch hier wurde über Dropdown-Menüs gearbeitet, die jeweils spezifische Bewertungsfaktoren (0,2 für Rezyklierbarkeit und Trennbarkeit, 0,3 für Wiederverwendbarkeit und Demontierbarkeit) automatisiert zuweisen. Die resultierende Rückführbarkeit eines Bauteils wird berechnet, indem diese Faktoren mit der jeweiligen Masse multipliziert und wiederum anteilig im CPX berücksichtigt werden. Auch für diesen Bereich wurde eine aggregierte Analyse programmiert, mit der sich Rückschlüsse auf die zirkulären Qualitäten ganzer Konstruktionsbereiche ziehen lassen.

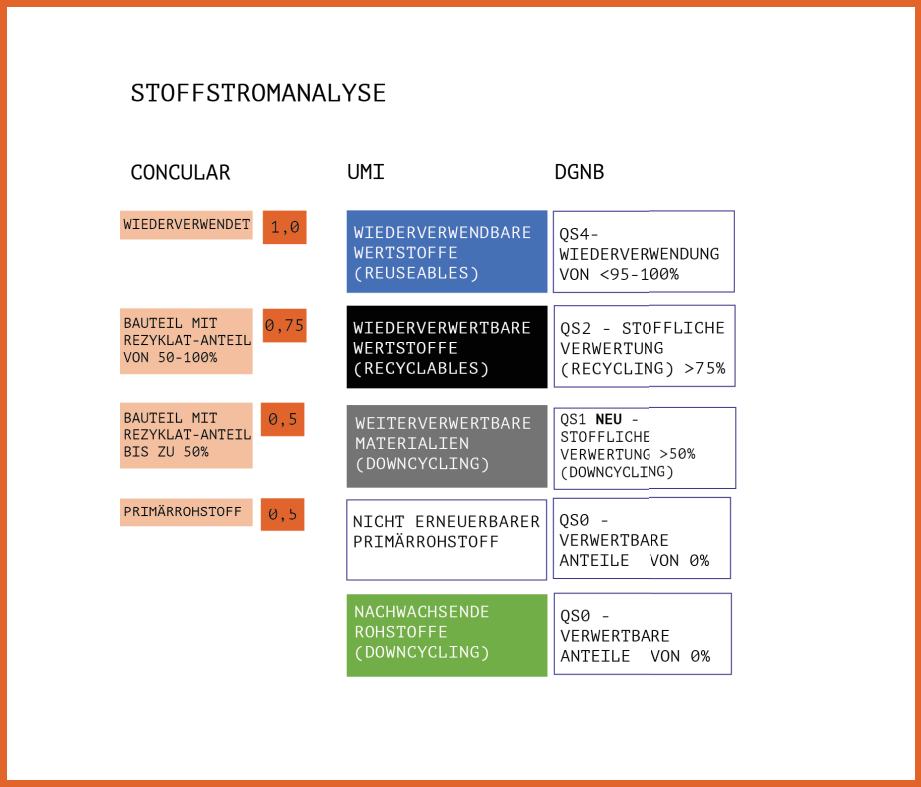
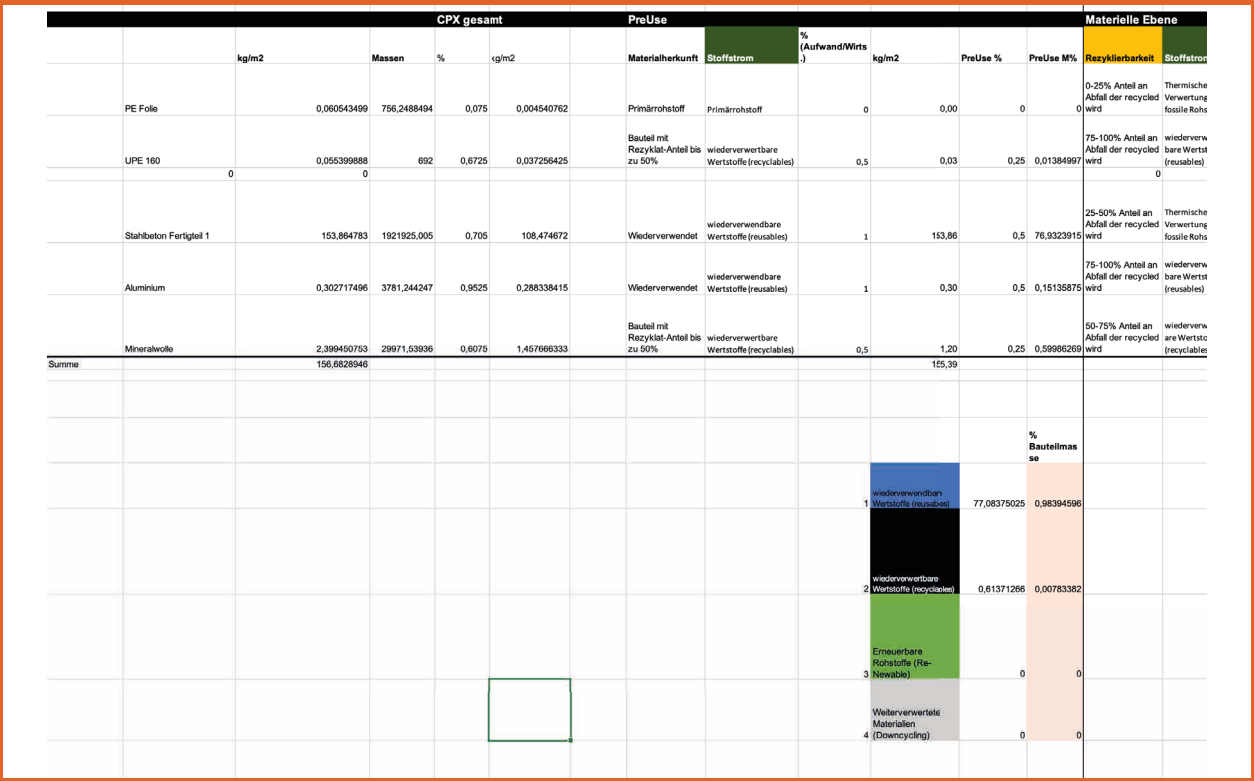


Abb. 80: Prinzipdarstellung der Zuordnung der Komponenten Zuordnung im Pre Use

Ein entscheidender Mehrwert wurde zudem durch die Einführung einer erweiterten Stoffstromlogik im Bewertungsmodell realisiert. Basierend auf den Referenzsystemen von DGNB und UMI wurde eine differenzierte Zuordnung von Materialqualitäten in den Stoffstrom etabliert. So wurde im Pre-Use-Bereich zwischen „wiederverwendbaren Wertstoffen“, „recyclierbaren Materialien“, „Downcycling-Materialien“, „Primärrohstoffen“ und „erneuerbaren Rohstoffen“ unterschieden. Die Zuordnung basiert auf der Kombination aus Materialherkunft und einem potenziellen Kreislaufwert und wird, analog zur Bewertung durch DGNB (Qualitätsstufen QS0 bis QS4), differenziert in die Auswertung übernommen. Die Zuordnung ist insofern angelegt, dass infolge der Kategorisierung der Concular mit DGNB und UMI Stoffstrominformationen, diese automatisch kategorisiert werden, ebenfalls über eine SUMMEWENN-Funktion.

Noch differenzierter erfolgt die Bewertung im Post-Use-Bereich. Die ursprünglich von Concular bereitgestellten Informationen zu Materialrückführung und Wiederver-



		CPX gesamt				PreUse						Materielle Ebene	
		kg/m2	Massen	%	cg/m2	Materialherkunft	Stoffstrom	% (Aufwand/Wirts.)	kg/m2	PreUse %	PreUse M%	Rezyklierbarkeit	Stoffstrom
	PE Folie	0,060543499	756,2488494	0,075	0,004540762	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0	0,00	0	0	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohs
	UPE 160	0,055399888	692	0,6725	0,037256425	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,5	0,03	0,25	0,01384997	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertst (reusables)
0		0										0	
	Stahlbeton Fertigteil 1	153,864783	1921925,005	0,705	108,474672	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1	153,86	0,5	76,9323915	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohs
	Aluminium	0,302717496	3781,244247	0,9525	0,288338415	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1	0,30	0,5	0,15135875	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertst (reusables)
	Mineralwolle	2,399450753	29971,53936	0,6075	1,457666333	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,5	1,20	0,25	0,59986269	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)
Summe		156,6828946							155,39				

			% Bauteilmasse
1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	77,08375025	0,98394596
2	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,61371266	0,00783382
3	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0	0
4	Weiterverwertete Materialien (Downcycling)	0	0

Abb. 81: Excel Ausschnitt mit Umwidmung zu den Stoffkreislauf-Angaben im Pre Use

wendbarkeit wurden um eine erweiterte Systematik ergänzt, die den Fokus auf den tatsächlichen Recyclinganteil legt. Denn wie sich im Verlauf der Analyse zeigte, ist es weitaus zielführender, den Rückführungspfad eines Bauteils an dessen stofflicher Rezyklierbarkeit zu bemessen als allein an seiner Wiederverwendbarkeit. Letztere ist oft normativ oder funktional begrenzt, während eine hohe Recyclingfähigkeit einen weitreichenderen Beitrag zur Abfallvermeidung und Ressourcenschonung leisten kann. Auch hier werden die ursprünglichen eingaben nicht grundsätzlich verändert, sondern nach der neuen Kategorisierung umgedeutet, sodass man Informationen zu den Stoffstromeigenschaften im Post Use erhält.

Die Stoffstromanalyse im Post-Use wurde deshalb so aufgebaut, dass die Recyclinganteile in vier Kategorien differenziert werden (0–25 %, 25–50 %, 50–75 %, 75–100 %) sowie eine zusätzliche Kategorie für kompostierbare Materialien integriert wurde. In Kombination mit den Rückbaubedingungen (Trennbarkeit, Demontierbarkeit etc.) lässt sich daraus ein realistisches Rückführungspotenzial

PRE USE

MATERIALHERKUNFT

STOFFSTROMANALYSE DER MATERIALHERKUNFT

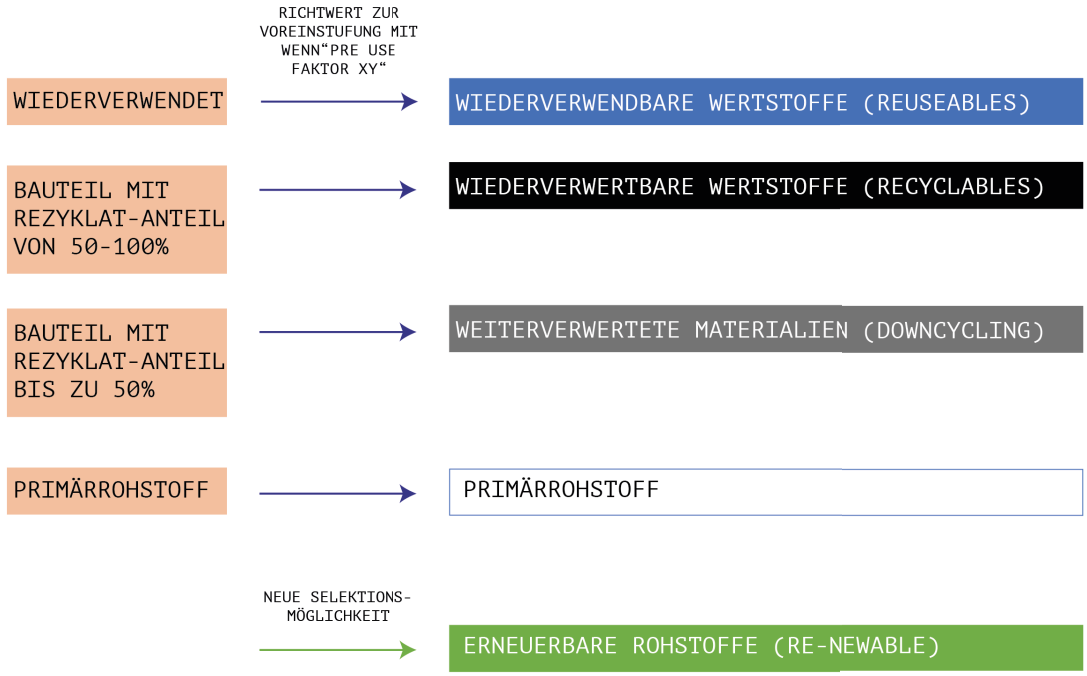
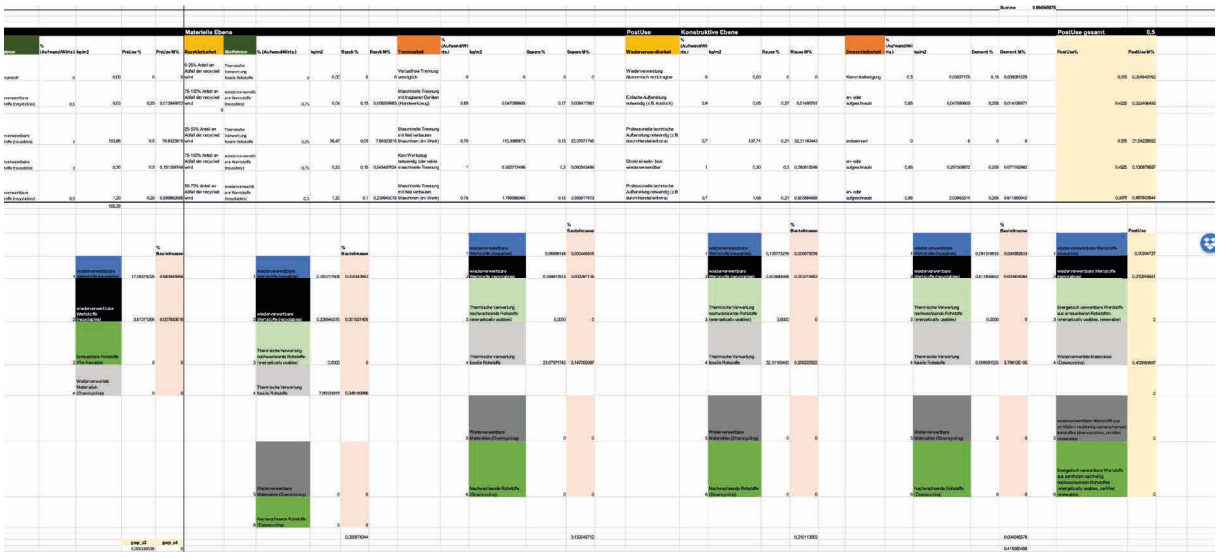


Abb. 82: Prinzipdarstellung der Zuordnung im Pre Use gemäß der Stoffströme

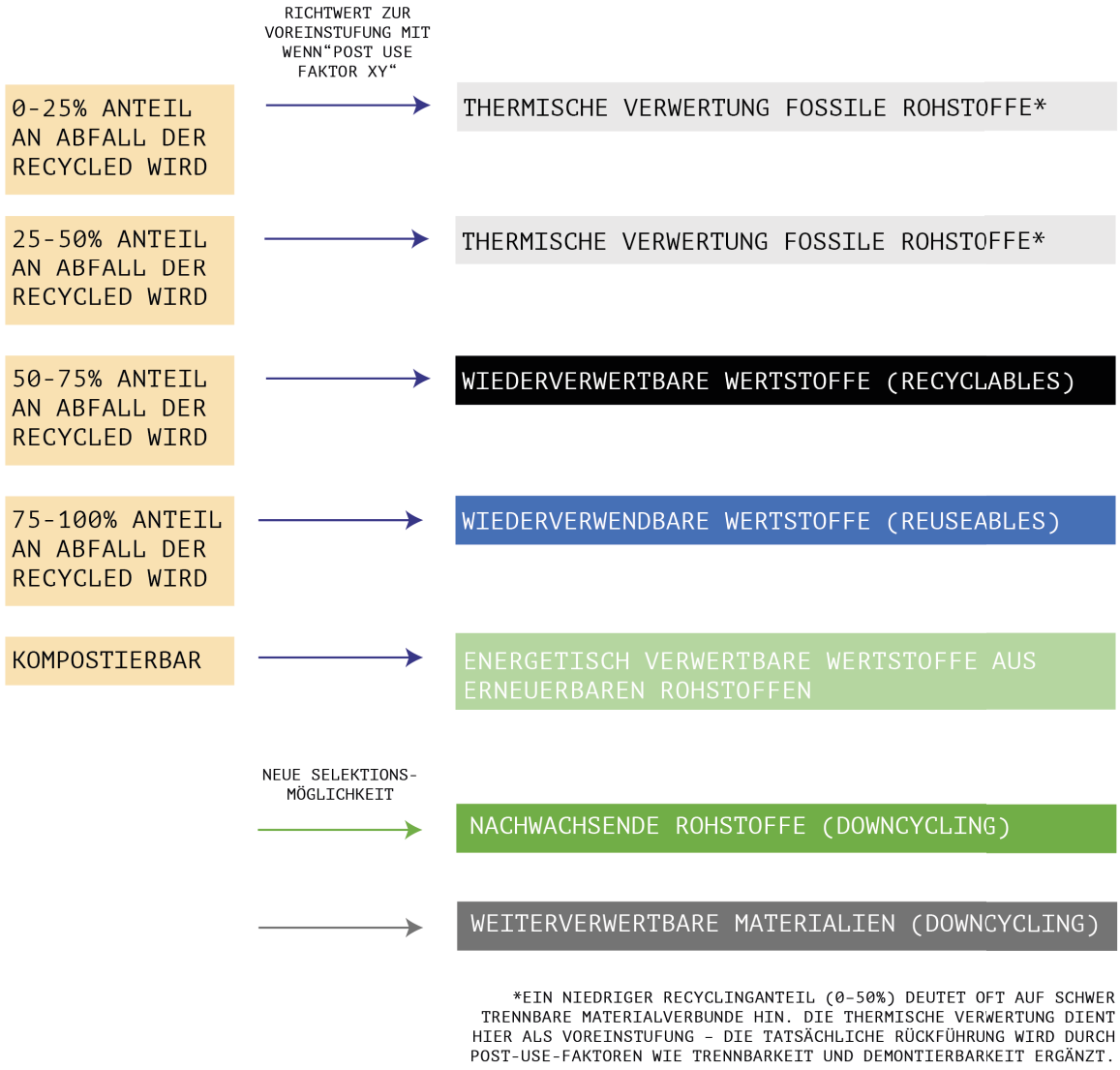
Abb. 83: Excel Ausschnitt mit Umwidmung zu den Stoffkreislauf-Angaben im Pre Use



POST USE

MATERIAL EBENE

REZYKLIERBARKEIT



*EIN NIEDRIGER RECYCLINGANTEIL (0–50%) DEUTET OFT AUF SCHWER TRENNBARE MATERIALVERBUNDE HIN. DIE THERMISCHE VERWERTUNG DIENT HIER ALS VOREINSTUFUNG – DIE TATSÄCHLICHE RÜCKFÜHRUNG WIRD DURCH POST-USE-FAKTOREN WIE TRENNBARKEIT UND DEMONTIERBARKEIT ERGÄNZT.

Abb. 84:
Prinzipdarstellung der Zuordnung im Post Use gemäß der Stoffströme

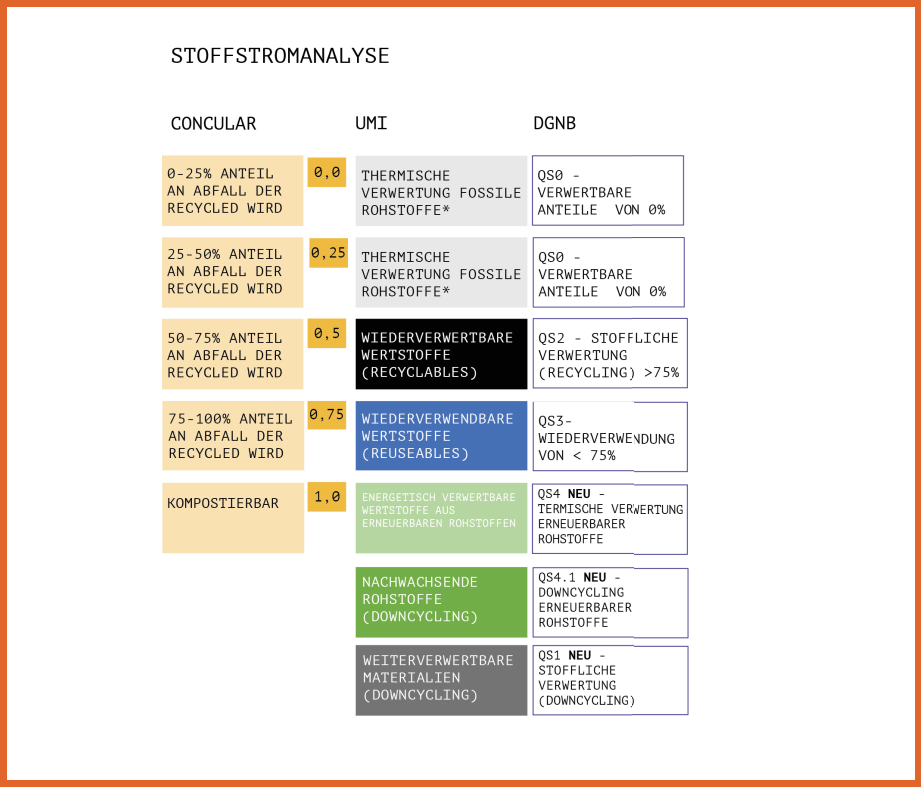


Abb. 85: Prinzipdarstellung der Zuordnung der Komponenten Zuordnung im Post Use

ableiten. Beispielhaft wurde berechnet, dass ein Bauteil mit 1 kg Masse, einem Recyclinganteil von 90 %, Trennbarkeit 0,3, Wiederverwendbarkeit 0,27 und Demontierbarkeit 0,255 nur rund 18,6 g real rückgeführt werden können, was den deutlichen Unterschied zwischen idealtypischer und realistischer Kreislauffähigkeit verdeutlicht.

Ein weiterer wesentlicher Baustein der erweiterten Methodik ist die systematische Integration nachwachsender Rohstoffe in die Bewertungslogik zirkulären Bauens. Während Wiederverwendung und stoffliches Recycling bereits als etablierte Strategien zur Ressourcenschonung gelten, eröffnet die Berücksichtigung nachwachsender Materialien einen zusätzlichen, ökologisch hochrelevanten Handlungspfad. Biogene Baustoffe wie Holz, Hanf oder Stroh weisen nicht nur eine positive CO_2-Bilanz auf, da sie während ihres Wachstums Kohlenstoff binden und als sogenannte Kohlenstoffsenken fungieren, sondern vielmehr eine biologische Rückführung in natürliche Stoffkreisläufe ermöglichen. Dies ist insbesondere dann

der Fall, wenn die Materialien sortenrein, schadstofffrei und demontierbar verbaut wurden.

Darüber hinaus stärken nachwachsende Rohstoffe die Versorgungssicherheit, da sie im Gegensatz zu fossilen und mineralischen Primärrohstoffen innerhalb vergleichsweise kurzer Zeitspannen regeneriert werden können. Dies reduziert nicht nur die Abhängigkeit von begrenzten oder geopolitisch sensiblen Ressourcen, sondern unterstützt eine langfristige Resilienz des Bauwesens im Sinne einer ökologischen Kreislaufwirtschaft. Die ergänzende Kategorisierung dieser Materialgruppe innerhalb der Excel-basierten Bewertungsmatrix zum Beispiel über ein Auswahlfeld „nachwachsender Rohstoff“ im Pre-Use-Bereich trägt dieser Bedeutung Rechnung. Sie erweitert die Bewertungssystematik um eine biobasierte Komponente und ermöglicht eine differenziertere Betrachtung innerhalb der Stoffstromanalyse.

Diese Erweiterung folgt auch dem Anspruch, nicht nur möglichst viele Bauteile wiederzuverwenden, sondern darüber hinaus die eingesetzten Materialien so zu wählen, dass sie nach ihrer Nutzung möglichst verlustfrei in technologische oder biologische Kreisläufe rückgeführt werden können. Der ökologische Mehrwert nachwachsender Rohstoffe liegt dabei nicht nur in ihrer Verwendung, sondern auch in der Art ihrer Rückführung: Kompostierbarkeit, thermische Verwertung mit CO_2-Kompensation und biologische Abbaubarkeit stellen hier entscheidende Vorteile dar. Darüber hinaus erfahren nachwachsende Rohstoffe auch in anerkannten Nachhaltigkeitszertifikaten wie dem QNG oder der DGNB eine zunehmend stärkere Gewichtung, was ihre strategische Bedeutung in planerischen und fördertechnischen Zusammenhängen weiter erhöht. Insgesamt zeigt sich, dass die Berücksichtigung nachwachsender Rohstoffe nicht nur eine konsequente Erweiterung der Zirkularitätsbewertung darstellt, sondern auch ein zentraler Beitrag zu einem resilienten, klimaorientierten und zukunftsfähigen Bauwesen ist.

Ergänzend wurden auch qualitative Faktoren wie Materialart und Rückbautechnologie berücksichtigt: Eine

gemörtelte Ziegelwand etwa erhielt andere Rückbaubewertungen als ein mechanisch lösbarer Wandaufbau. Durch diese Verknüpfung wurde ein praxisnaher Maßstab geschaffen, der in der Lage ist, nicht nur zu analysieren, sondern gezielt zu differenzieren: Welche Bauteile tragen wie zum zirkulären Potenzial eines Entwurfs bei?

Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass dieses Modell experimentelle Szenarien und entwerferische Varianten flexibel abbilden kann. Durch einfache Anpassung der Materialwahl, Konstruktionsweise oder Rückbaueigenschaft im Dropdown-Feld lassen sich unmittelbare Auswirkungen auf die Gesamtbewertung simulieren. Dies erlaubt nicht nur eine dynamische Auseinandersetzung mit Zirkularität im Entwurf, sondern auch eine klare Kommunikation gegenüber Bauherr:innen, die so die ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Entscheidungen direkt nachvollziehen können.

Darüber hinaus wurden die Concular-Ergebnisse zur Masse, CO_2-Bilanz (GWP) und dem Materialwert ebenfalls in die Excel-Systematik integriert. Dabei wurde insbesondere Wert darauf gelegt, dass alle Ausgaben auch normiert auf m^2-Fläche oder Bauteilgruppen erfolgen können und damit gibt es ein Feature, das Concular bislang nur eingeschränkt abbildet. Die Ausgabe der Daten in vereinheitlichten Formaten (z. B. kg/m^2, €/m^2, kgCO_2e/m^2a) ermöglicht nicht nur eine bessere Vergleichbarkeit, sondern ist insbesondere im Kontext von Zertifizierungssystemen wie QNG, DGNB oder EU-Taxonomie von entscheidender Bedeutung.

Schließlich lässt sich aus dieser methodischen Erweiterung eine zentrale Erkenntnis ableiten: Die kombinierte Analyse von Rezyklierbarkeit, Materialherkunft und Rückbauaufwand schafft eine realitätsnahe, datenbasierte Bewertungsgrundlage für zirkuläre Architekturkonzepte. Die in Excel nachgebildete Berechnungsmethodik ersetzt dabei nicht die Tools wie Concular, sondern ergänzt sie durch ein vertieftes, nachvollziehbares Verständnis und liefert so einen entscheidenden Beitrag zur Professionalisierung und Skalierbarkeit zirkulärer Entwurfsstrategien.

Weiterentwicklung im Bereich des GWPs

Im Rahmen der vertieften Analyse wurde auch die Berechnung und Auswertung der Treibhausgasemissionen (GWP – Global Warming Potential) auf Grundlage der in Concular vorliegenden Daten in ein erweitertes Excel-Modell übertragen. Ziel war es, die vorhandenen Werte nicht nur zu dokumentieren, sondern diese mit der zuvor entwickelten Logik der Stoffstromanalyse systematisch zu verknüpfen. Auf dieser Basis sollten differenzierte Aussagen darüber möglich werden, wie sich Emissionen auf konkrete Materialgruppen, Bauteilschichten und stoffliche Verwertungswege zurückführen lassen. Ausgangspunkt war die Übernahme der in Concular ermittelten GWP-Werte, die zunächst als Ausgangsdaten für jedes Bauteil tabellarisch in Excel eingetragen wurden.

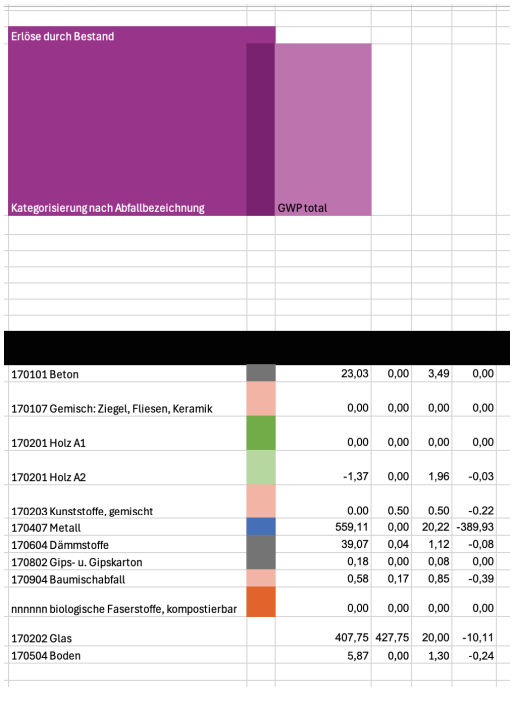
Dabei zeigte sich rasch, dass zur Erhöhung der Lesbarkeit und zur tieferen Interpretation der Ergebnisse eine zusätzliche Kategorisierung der GWP-Werte erforderlich ist. Während Concular die CO_2-Äquivalente bauteilbezogen darstellt – etwa getrennt nach Wand, Decke oder Fens-



Abb. 86: Abfallkategorien als Grundlage für Material-Zuordnung

ter – reicht diese Betrachtung für eine gesamtheitliche Bewertung des Gebäudes nicht aus. Um also zu verstehen, welche Materialien tatsächlich die größten Emissionstreiber sind, wurde eine Gruppierung nach stofflich-homogenen Materialkategorien vorgenommen. Diese Zuordnung orientierte sich an den Abfallklassifikationen und Verwertungspfaden, wie sie bereits in der Zirkularitätsbewertung verwendet wurden. Ziel war es, eine einheitliche Kategorisierung entlang von stofflichen Eigenschaften zu schaffen, etwa in Gruppen wie „170101 Beton“, „170202 Glas“, oder „170203 Kunststoffe gemischt“.

Diese Materialgruppen wurden mit den jeweiligen GWP-Werten verknüpft, wodurch eine transparente grafische Darstellung der Emissionen nach Stoffströmen möglich wurde. In den erzeugten Diagrammen lässt sich nun unmittelbar ablesen, welcher Anteil der Gesamtemissionen auf welche Fraktionen entfällt – und in welchem Umfang die jeweiligen Materialien zur Emissionsbilanz des Gesamtgebäudes beitragen. Die Darstellung erfolgt dabei in Form eines gestapelten Säulendiagramms, was die ad-



170101 Beton	23,03	0,00	3,49	0,00
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0,00	0,00	0,00
170201 Holz A1	0,00	0,00	0,00	0,00
170201 Holz A2	-1,37	0,00	1,96	-0,03
170203 Kunststoffe, gemischt	0,00	0,50	0,50	-0,22
170407 Metall	559,11	0,00	20,22	-389,93
170604 Dämmstoffe	39,07	0,04	1,12	-0,08
170802 Gips- u. Gipskarton	0,18	0,00	0,08	0,00
170904 Baumischabfall	0,58	0,17	0,85	-0,39
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,00	0,00	0,00	0,00
170202 Glas	407,75	427,75	20,00	-10,11
170504 Boden	5,87	0,00	1,30	-0,24

Abb. 87:
Selektion der GWP Gesamt Werte entsprechend der Abfallkategorien

ditive Zusammensetzung der Emissionen pro Kategorie auf einen Blick visualisiert. Als Bezugsgröße wurde dabei die Einheit $kgCO_2e/m^2a$ gewählt, um eine direkte Vergleichbarkeit mit gängigen Nachhaltigkeitszertifizierungen wie DGNB oder QNG herzustellen. Diese normierte Darstellung erlaubt es, die absoluten Werte der Emissionen pro Quadratmeter und Jahr zu erfassen, was insbesondere für die spätere Einordnung in Zertifizierungsziele und Grenzwertkataloge von zentraler Bedeutung ist.

Zentraler Bestandteil dieser erweiterten Auswertung ist zudem die Sichtbarmachung von sogenannten „Erlösen“ im Emissionskontext. In Concular werden die CO_2-Einsparungen durch Wiederverwendung bestehender Bauteile nicht ausdrücklich als solche ausgewiesen. Im Excel-Modell wurde dies nun gezielt nachgeholt: Bauteilmassen, die nicht neu produziert werden mussten, sondern aus dem Bestand übernommen wurden, wurden als vermiedene Emissionen mit negativem Vorzeichen in die GWP-Bilanz eingetragen. So wird in der grafischen Auswertung deutlich erkennbar, welcher „Erlös“ sich



Abb. 88:
Zuordnung von Material, Abfallkategorie und Stoffstromangabe als Selektions Grundlage

durch Bestandserhalt tatsächlich ergibt – etwa durch eingesparte Herstellungsprozesse, Transporte oder Rohstoffförderung.

Doch nicht nur der Bestandserhalt wird als Emissionsvorteil berücksichtigt: In bestimmten Nutzungsvarianten war es Ziel, einen möglichst hohen Rezyklatanteil in neue Bauteile zu integrieren. In diesen Fällen wurde ebenfalls eine Differenzberechnung vorgenommen: Der Emissionswert der konventionellen Herstellung wurde dem realen, rezyklatoptimierten Wert gegenübergestellt, und die daraus resultierende Einsparung als weiterer „Erlös“ in die Bilanz aufgenommen. Diese Methodik erlaubt eine differenzierte Darstellung, welche Treibhausgasreduktionen sich durch gezielte Entscheidungen hinsichtlich der Materialqualität und der Herkunft, wie beispielsweise Rezyklat vs. Primärrohstoff, ergeben.

Die visuelle Umsetzung dieser Differenzwerte erfolgte über ein erweitertes Balken- bzw. Kreisdiagramm, in dem sowohl positive Emissionen als auch negative „Er-

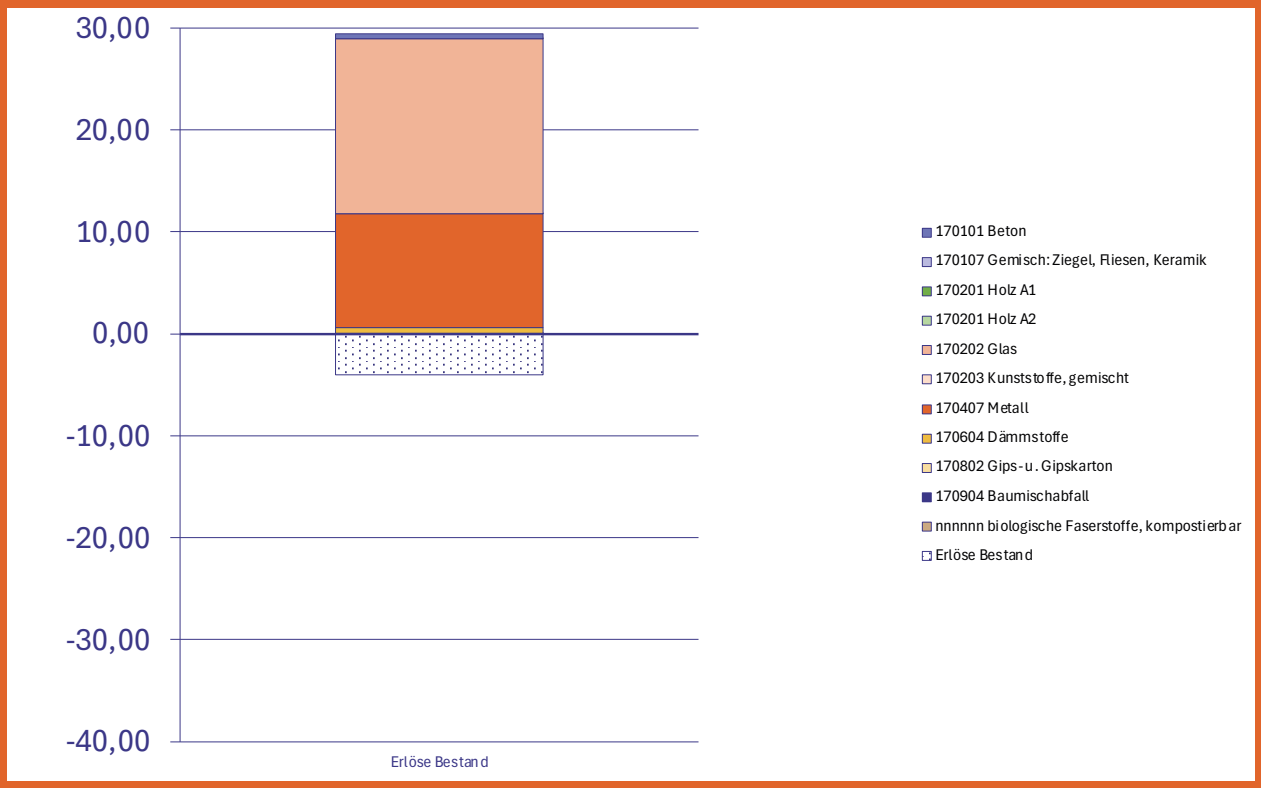


Abb. 89: Exemplarischer Stapelgraph mit Einteilung nach Abfallkategorie und zusätzlichem Blick auf Erlöse

lös“-Komponenten integriert sind. Die negative Ausweisung erfolgt dabei analog zu eingesparten Treibhausgasen, sodass sofort ersichtlich wird, welche Maßnahmen z. B. Wiederverwendung oder Rezyklatanteil in welchem Umfang zur Emissionsminderung beigetragen haben. Diese Darstellung erweitert somit die Bewertung des GWP erheblich: Sie zeigt nicht nur die Belastung, sondern auch die Wirkung strategischer Materialwahl im Sinne emissionsreduzierter Planung.

Besondere Aufmerksamkeit erhielt in diesem Zusammenhang auch die Verknüpfung der Emissionen mit der Stoffstromkategorisierung. Während bisherige Tools wie Concular lediglich die Endwerte der GWP-Bilanz bereitstellen, wurde im Excel-Modell jede Veränderung einer Materialentscheidung etwa die Substitution durch ein Produkt mit höherem Rezyklatanteil direkt an die jeweiligen Stoffstromgruppen zurückgebunden. Dadurch konnte abgeleitet werden, ob sich die Emissionseinsparung unteranderem in der Kategorie „wiederverwertbare Materialien“ oder „wiederverwendete Bauteile“ vollzogen

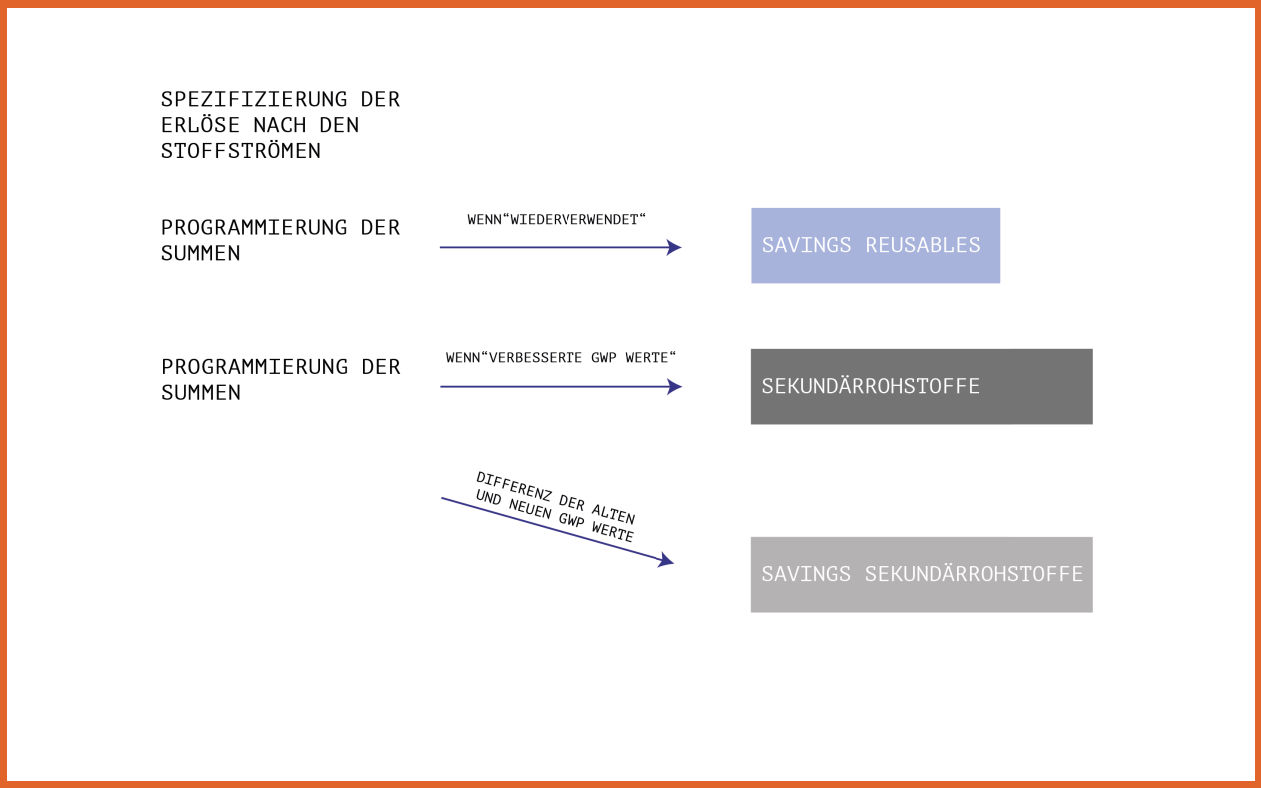


Abb. 90: Prinzip der Selektion der Savings durch die Wahl von einsparenden GWP Werten

hat. Dies erhöht die interpretative Tiefe der Auswertung und erlaubt eine strategische Rückkopplung in den Entwurfsprozess.

Auf diese Weise wurde eine überaus praxisnahe, datengetriebene Grundlage geschaffen, um materialbasierte Emissionsstrategien für das gesamte Gebäude zu entwickeln. Nicht nur lassen sich damit die CO_2-Emissionen einzelner Materialien transparent bewerten, sondern auch die realen Potenziale zur Reduktion durch zirkuläre Planungsentscheidungen messbar und vergleichbar machen. Die Verbindung von Massendaten, GWP-Werten und stofflicher Klassifikation bietet eine bislang nicht erreichte Präzision in der ganzheitlichen Analyse zirkulärer Gebäudestrategien – und zeigt auf, wie ressourceneffizientes Planen nicht nur ökologisch, sondern auch nachvollziehbar gesteuert und kommuniziert werden kann.

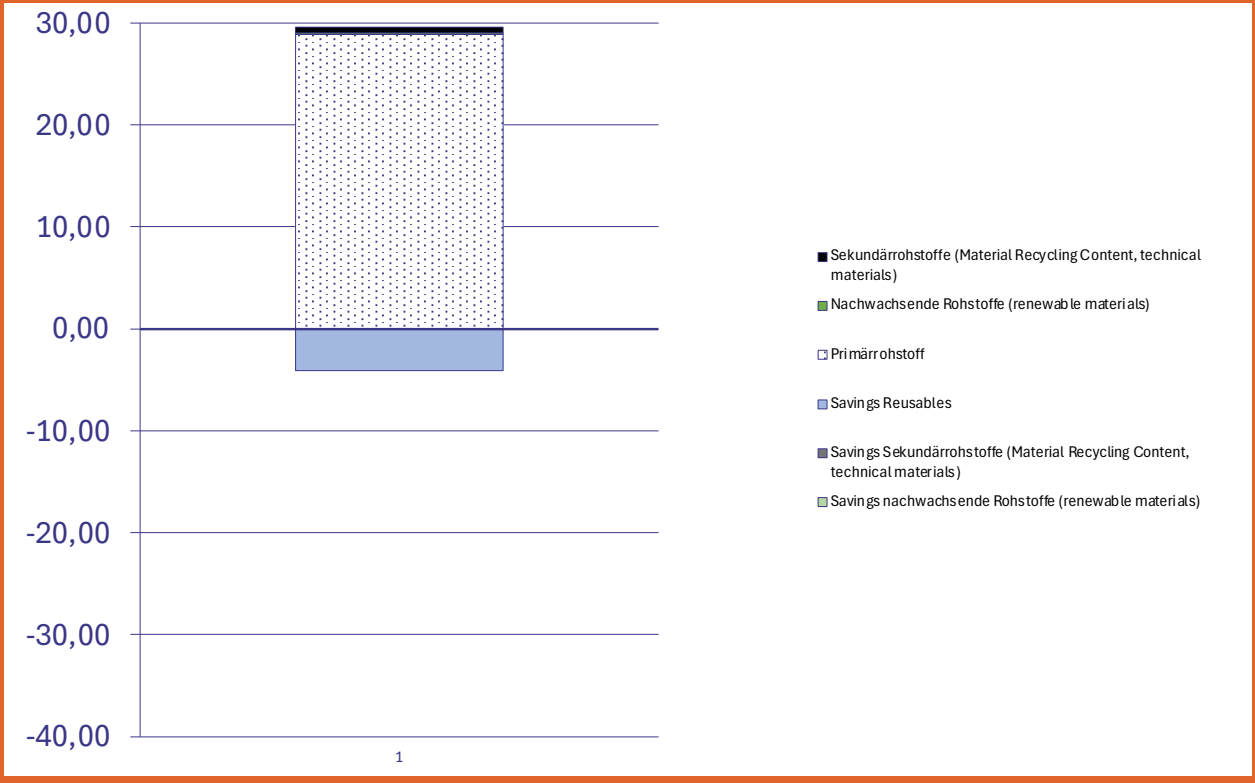


Abb. 91: Exemplarische Stapelgraph mit tatsächlichen GWP Werten sowie aufgeschlüsselte Erlöse, die gespart werden

Weiterentwicklung im Bereich der Kostenbetrachtung

Im Rahmen der erweiterten Datenauswertung wurde in einem weiteren Schritt die Kostenbewertung in das Excel-basierte Analysemodell integriert, um auch diesen zentralen ökonomischen Parameter systematisch mit der Stoffstromanalyse und den Bewertungsmechanismen der Zirkularität zu verknüpfen. Dabei wurde bewusst nicht nur auf die klassischen Baukosten fokussiert, sondern der Bewertungsrahmen um Verwertungs- und Entsorgungskosten sowie potenzielle Erlöse beim Rückbau ergänzt und dann Kostenpositionen umfasst, die im Kontext zirkulären Bauens einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtökonomie eines Gebäudes haben können.

Zunächst wurden die allgemeinen Baukosten auf Grundlage des Baukosteninformationszentrums (BKI) ermittelt und in drei wesentliche Bereiche unterteilt: die reinen Errichtungskosten, die prognostizierten Rückbaukosten sowie die Entsorgungskosten. Diese Werte wurden tabellarisch aufbereitet und mit Barwerten ergänzt, um

Abb. 92:
Zuordnung von Material, Abfallkategorie und Stoffstromangabe als Selektions Grundlage



eine möglichst realistische Einschätzung über die zeitlich versetzten Kostenpositionen zu erhalten. Zwar sind diese Angaben insbesondere im Kontext eines Bestandsgebäudes nur Näherungswerte und nicht zuletzt deshalb, weil reale Projektpreise stark von Ausschreibungen, regionalen Unterschieden oder Schadstoffbelastungen abhängig sind. Dennoch bietet diese Gliederung ein strukturiertes Raster für die Bewertung möglicher Rückbau- und Entsorgungsszenarien.

Aus der Sicht der Planungs- und Entscheidungsunterstützung war jedoch bald ersichtlich, dass eine reine Aufsummierung dieser klassischen Kostenpositionen nicht ausreicht, um die zirkuläre Wertschöpfung eines Gebäudes realistisch abzubilden. Vielmehr stellte sich die Frage, wie auch potenzielle Erlöse, z. B. durch den Verkauf rückgebauter Materialien oder durch vermiedene Entsorgungskosten, in die Bewertung einfließen können. Genau hier wurde die Kostenlogik des Urban Mining Index (UMI) aufgegriffen, der gezielt aufzeigt, dass die stoffliche Qualität und Rückbaufähigkeit von Bauteilen einen di-

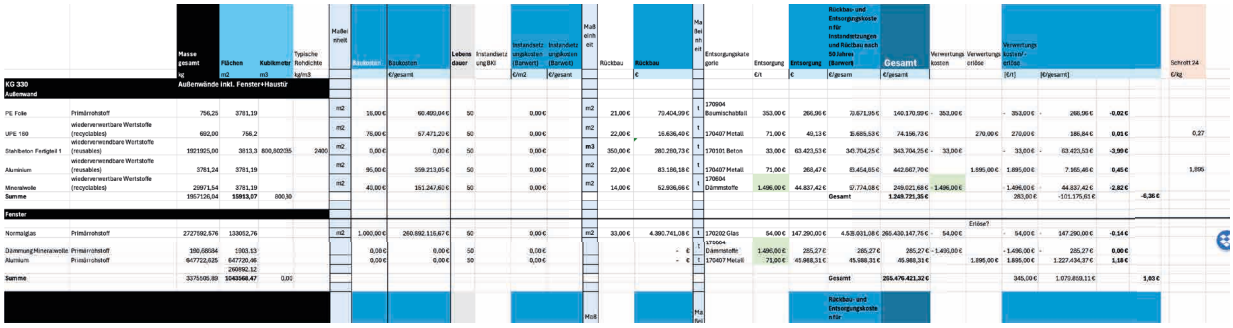
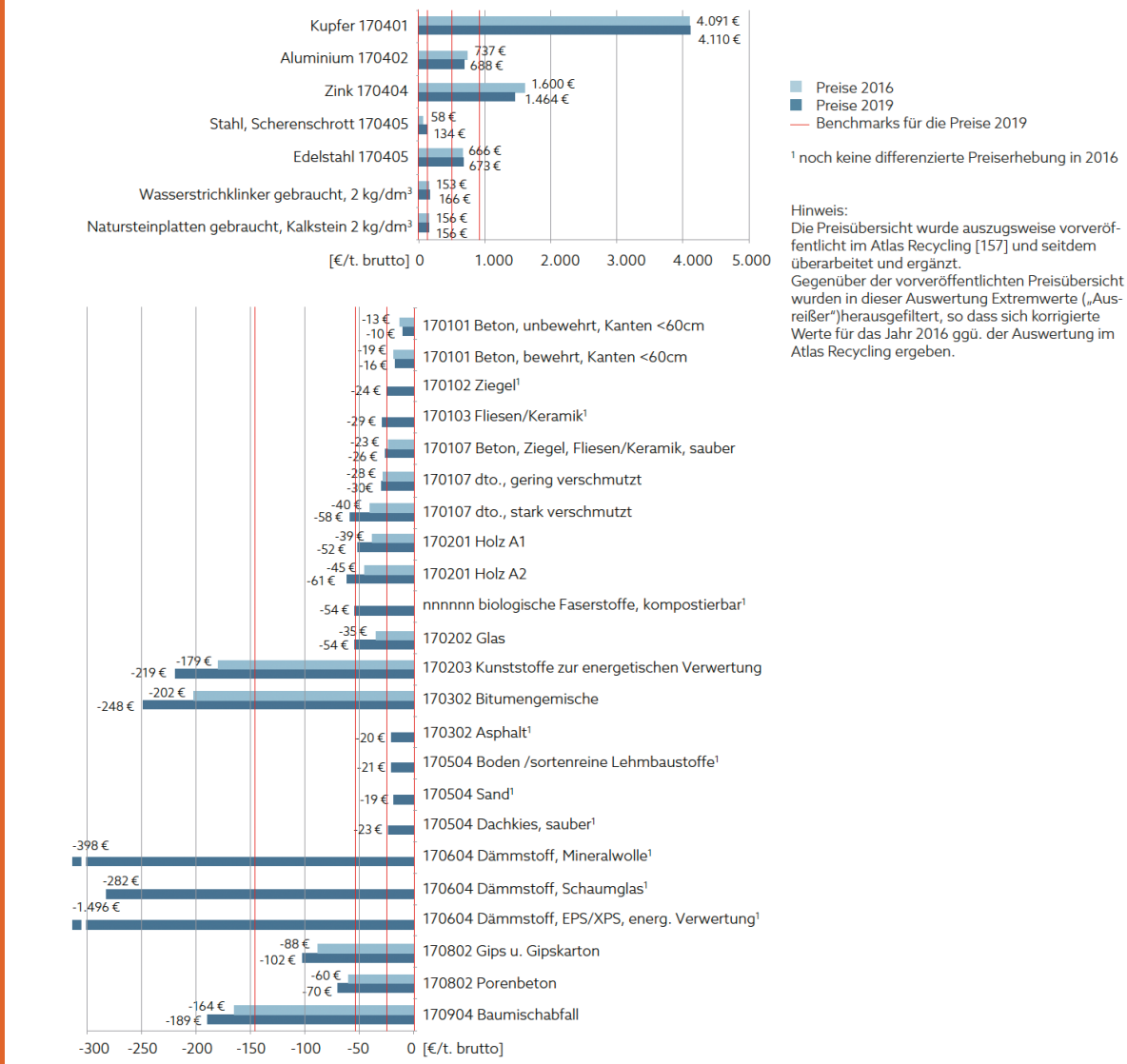


Abb. 93: Excel Eingabe Maske mit den verschiedenen Kosten-Analyseebenen

rekten Einfluss auf die entstehenden Kosten am Lebensende eines Gebäudes haben, was sowohl negativ durch hohe Entsorgungskosten als auch positiv durch potenzielle Rückbaugewinne sein kann.

Diese Erkenntnis floss in die Excel-Tabellenstruktur ein: Neben den klassischen Baukosten wurden dort systematisch die Verwertungskosten und -erlöse auf Grundlage der Stoffstromlogik abgebildet. Die Datengrundlage bildet hier eine Kategorisierung nach Abfallarten (z. B. Metalle, Beton, Glas, Gips, Kunststoffe), die zugleich mit den

Abb. 94:
Verwertungs-
kosten- und -
Erlöse gemäß dem
Recylingatlas



entsprechenden durchschnittlichen Verwertungskosten oder -erlösen pro Quadratmeter (€/m²) hinterlegt wurde. Auf dieser Basis lassen sich nicht nur Kosten nach Materialgruppen ausweisen, sondern diese auch unmittelbar in Bezug zu den jeweils vorhandenen Bauteilmassen setzen, wodurch eine präzise und belastbare Aussage über die kostenrelevanten Effekte einzelner Bauteilentscheidungen ermöglicht wird.

Im Rahmen der Excel-basierten Kostenanalyse wurden zur realistischen Bewertung der Verwertungskosten und -erlöse verschiedene Quellen herangezogen, um die Spannbreite marktüblicher, empirisch fundierter und praxisnaher Werte zu erfassen. Grundlage für die monetäre Bewertung der Rückbaupotenziale waren dabei insbesondere der Urban Mining Index (UMI), die Plattform Schrott24 sowie das Baukosteninformationszentrum (BKI). Während der UMI vor allem durch seine wissenschaftlich fundierten, auf Rückbaustudien basierenden Daten überzeugt, ermöglicht Schrott24 die Orientierung an aktuellen Marktpreisen für wiederverwertbare Materialien, wie insbesondere die Metalle. Das BKI wurde ergänzend hinzugezogen, um Rückbau- und Entsorgungskosten auf Grundlage standardisierter Bauleistungsverzeichnisse zu bewerten. Die Verknüpfung dieser Quellen erlaubt eine valide Einordnung der in der Excel-Tabelle abgebildeten Materialflüsse, Erlöspotenziale und Entsorgungskosten. Zugleich stellt sie sicher, dass die Bewertung sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich fundiert erfolgt und für die planerische Entscheidungsfindung belastbare Aussagen getroffen werden können.

In den Portalen und Quellen ist man oft auf zwei Begriffe gestoßen: Entsorgungs- und Deponiekosten. Die Entsorgungskosten eines Bauteils setzen sich aus mehreren Teilleistungen zusammen, die entlang des Rückbauprozesses entstehen. Zunächst fallen Aufwendungen für die Demontage oder den Abbruch an, beispielsweise beim Rückbau eines Dachs. Daran schließt sich die Sortierung und Trennung der verschiedenen Materialien an – etwa die Separierung von Beton und Dämmstoffen. Anschließend müssen die Materialien verladen und zur entspre-

chenden Entsorgungs- oder Verwertungsstelle transportiert werden. Je nach Materialqualität folgen entweder Verwertungs- oder Recyclingkosten oder, sofern eine stoffliche Verwertung nicht möglich ist, Deponiekosten. Letztere entstehen insbesondere dann, wenn Materialien nicht wiederverwertbar sind, und umfassen Deponiegebühren pro Tonne oder Kubikmeter (gestaffelt nach Deponieklasse DK I–III), sowie Zusatzkosten für Wiegen, Einlagern, Abdecken und die langfristige Nachsorge der Deponie. Auch der Transport zur Deponie kann als separater Kostenpunkt ausgewiesen werden. Diese Aufschlüsselung macht deutlich, dass die Entsorgung insbesondere bei nicht trennbaren oder schadstoffbelasteten Materialien erhebliche finanzielle Belastungen verursachen kann.

Ein wesentlicher Mehrwert dieser methodischen Erweiterung liegt darin, dass die Kosten nicht nur nach materiellen Eigenschaften, sondern zusätzlich entlang der zuvor in der Zirkularitätsbewertung definierten Stoffstromqualitäten differenziert werden. So lassen sich bei-

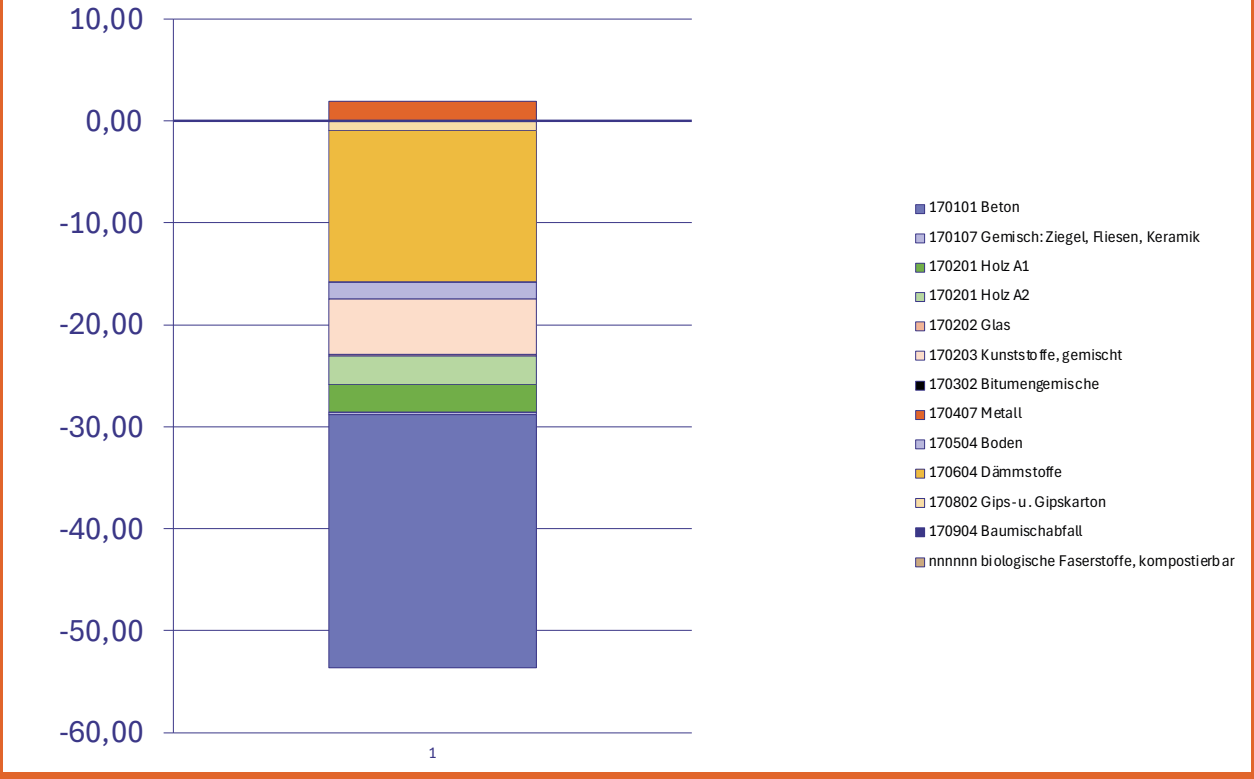


Abb. 95: Exemplarische Stapelgraph mit den Verwertungskosten und Erlösen gemäß den Abfallkategorien

spielsweise besonders hohe Verwertungskosten gezielt auf Materialien zurückführen, die nicht trennbar oder nicht recyclingfähig sind, während potenzielle Erlöse aus hochwertig rückgebauten, schadstofffreien und sortenreinen Materialien resultieren. Der Excel-Workflow macht sichtbar, ob diese ökonomischen Effekte auf wiederverwendete Materialien zurückgehen oder etwa durch den Einsatz von Rezyklaten mit niedriger Entsorgungsrelevanz erzielt werden.

Gerade für Planende, aber auch für Bauherr:innen, stellt diese mehrdimensionale Kostenanalyse ein äußerst relevantes Entscheidungstool dar. Denn sie verdeutlicht, dass nicht allein die anfänglichen Baukosten über die Wirtschaftlichkeit eines Gebäudes entscheiden, sondern vielmehr die strategische Wahl der Materialien, ihre stoffliche Qualität und die daraus resultierende Verwertungsperspektive. Wer frühzeitig Bauteile so auswählt, dass sie sich am Lebensende kostengünstig oder sogar mit Gewinn rückbauen lassen, minimiert nicht nur finanzielle Risiken, sondern schafft auch einen echten Mehrwert im

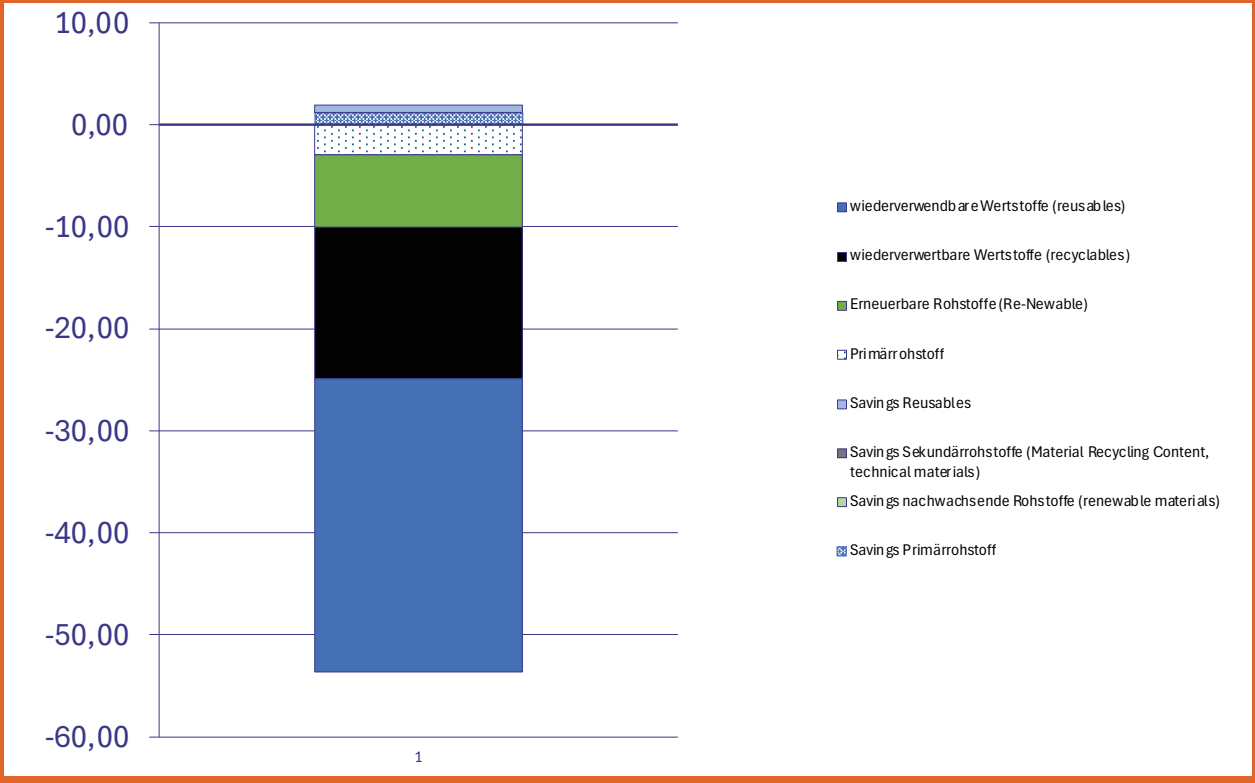


Abb. 96: Exemplarische Stapelgraph mit den Verwertungskosten und Erlösen gemäß den Stoffströmen

Sinne zirkulären Bauens.

Die Kombination aus Bau-, Rückbau- und Entsorgungskosten einerseits und Verwertungsgewinnen andererseits bietet damit einen vollständigen Blick auf die ökonomische Seite des Lebenszyklus. Diese erweiterte Bewertung erlaubt es, die tatsächliche Werthaltigkeit eines Gebäudes nicht mehr allein über Herstellungskosten zu definieren, sondern auch über dessen Rückbaupotenzial und ressourcenschonende Zukunftsfähigkeit. Damit schließt sich ein zentraler Kreis in der Methodik dieser Untersuchung: Materialwahl, Zirkularitätsstrategie, Treibhausgasemissionen und Kosten werden in einem konsistenten System zusammengeführt und eröffnen Planenden wie Entscheidungsträger:innen neue Wege, um Gebäude nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich nachhaltig zu gestalten.

Weiterentwicklung im Bereich der Massenanalyse

Im Rahmen der erweiterten Bewertungsmethodik stellt die Massenermittlung einen zentralen Ausgangspunkt für sämtliche anschließenden Analyseschritte dar. Die Massen bilden nicht nur die quantitative Grundlage für die Berechnung des Circularity Performance Index (CPX), sondern sind ebenso maßgeblich für die Bewertung der Treibhausgasemissionen (GWP) sowie der Kostenentwicklung über den Lebenszyklus hinweg. Ihre Rolle ist insofern grundlegend, als sämtliche ökologischen und ökonomischen Kennwerte, ob CO_2-Emissionen, Verwertungskosten, Erlöse oder Rückbauaufwände auf der physischen Masse der eingesetzten Materialien basieren.

Aus diesem Grund wurde in der Excel-basierten Analyse eine präzise Kategorisierung der Bauteilmassen vorgenommen. Diese erfolgte entlang zweier zentraler Dimensionen: einerseits nach den festgelegten Abfallkategorien gemäß AVV (Abfallverzeichnisverordnung), andererseits anhand der zuvor definierten stoffstrombezogenen Klassifikationen aus der Zirkularitätsbewertung. Auf diese Weise wurde es möglich, die baustoffspezifischen Massenanteile nicht nur abstrakt zu erfassen, sondern ihnen auch konkrete ökologische und stoffliche Eigenschaften

zuzuordnen – etwa ihre potenzielle Wiederverwendbarkeit, Rezyklierbarkeit oder thermische Verwertbarkeit.

Diese Zuordnung ermöglicht insbesondere im Bereich der Rückbaubewertung eine deutlich differenziertere Betrachtung: Denn die Masse entscheidet in erheblichem Maße darüber, wie bedeutsam ein Bauteil innerhalb der Gesamtbilanz eines Gebäudes ist und zwar sowohl im Hinblick auf seine Emissionen als auch auf seine Verwertungskosten oder möglichen Erlöse. Ein schweres Bauteil aus mineralischem Primärmaterial mag im Einzelnen ökologisch nachrangig erscheinen, kann in der Summenbetrachtung jedoch zum dominanten GWP-Treiber avancieren. Umgekehrt kann eine leichte, aber hochpreisige Materialschicht (etwa eine Fassade mit hoher Wertschöpfungstiefe) bei geringem Masseanteil relevante Erlöspotenziale generieren, wenn sie hochwertig rückgebaut werden kann.

Insbesondere für die Bewertung von Instandsetzung und Rückbau ist die präzise Massenermittlung daher essen-

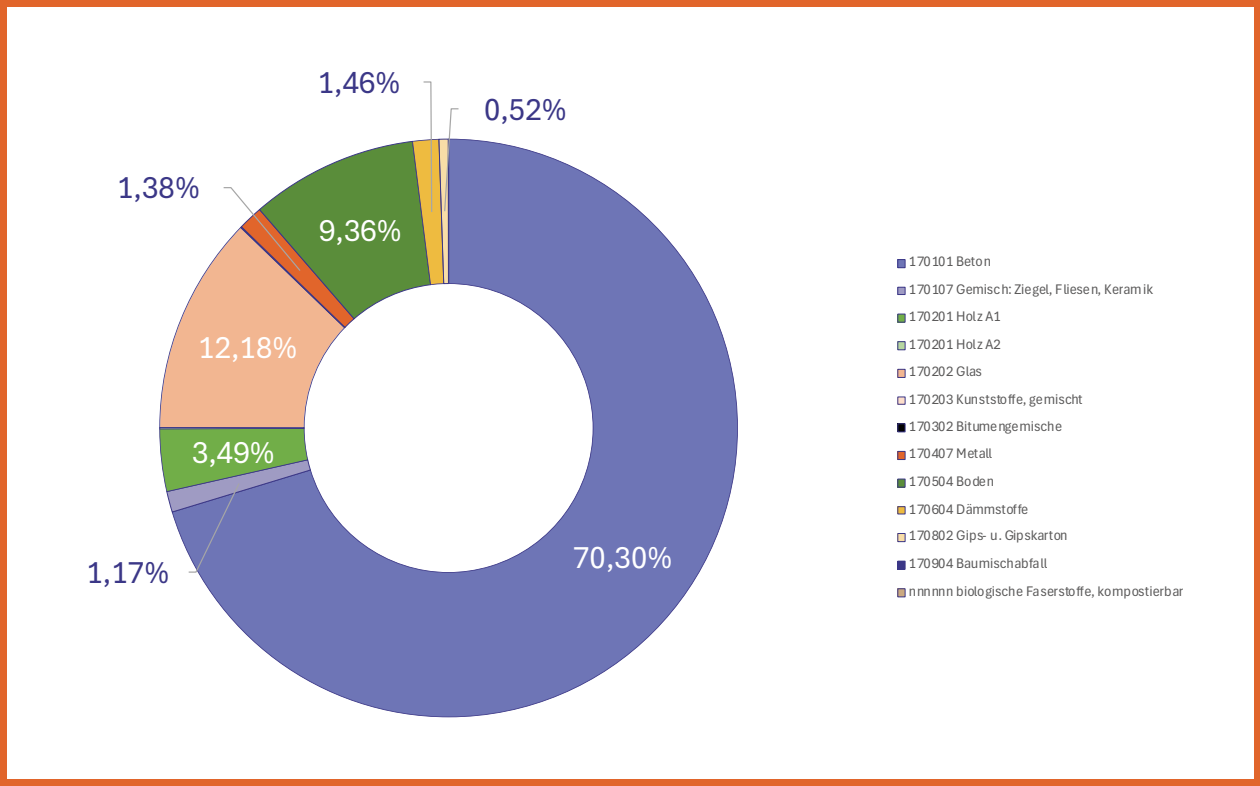


Abb. 97: Exemplarisches Kreisdiargramm mit den prozentualen Anteilen der Massen gemäß den Abfallkategorien

ziell. Nur wenn bekannt ist, welche Materialmengen bei einem zukünftigen Rückbau anfallen, lässt sich abschätzen, welche logistischen, energetischen oder finanziellen Aufwände damit einhergehen. Darüber hinaus spielt die Masse auch im Zusammenhang mit der bilanztechnischen Trennung von Pre-Use- und Post-Use-Phasen eine entscheidende Rolle: Je nach Masseverteilung und stofflicher Qualität verändert sich die Gewichtung der beiden Teilindikatoren innerhalb des CPX und das mit unmittelbaren Auswirkungen auf die Bewertung der Zirkularität eines Entwurfs.

Die Einbeziehung der Massen in die übergeordnete Systematik der stoffstrombezogenen Analyse bildet somit eine unverzichtbare Grundlage für die ganzheitliche Bewertung zirkulären Bauens. Sie schafft die notwendige Transparenz, um nicht nur qualitative Aussagen über die Nachhaltigkeit von Bauteilen zu treffen, sondern diese auch in physikalisch und ökonomisch belastbare Relationen zu setzen. Die Masse ist damit mehr als ein rein quantitativer Wert – sie wird zur tragenden Größe in der strategischen Bewertung und Optimierung zirkulärer Entwurfsprozesse.

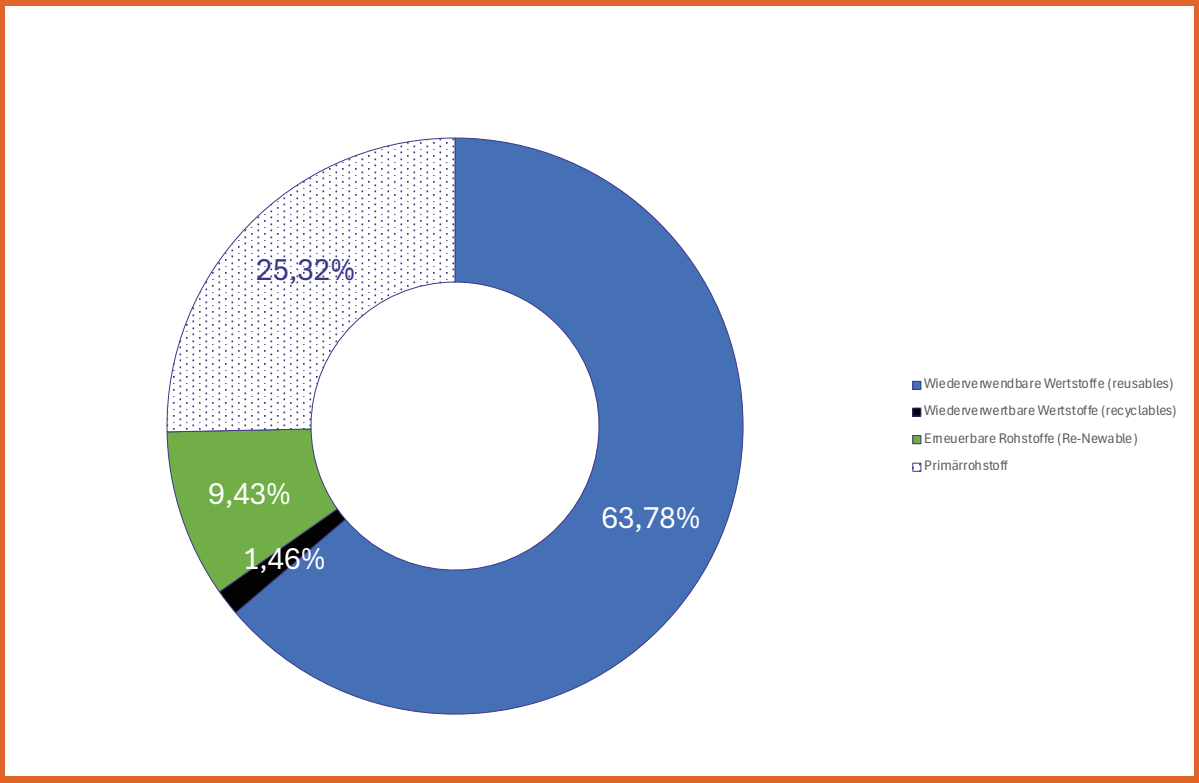


Abb. 98: Exemplarisches Kreisdiargramm mit den prozentualen Anteilen der Massen gemäß den Stoffstromangaben

5.3 Entwurf adaptiver Konzepte für das Berufskolleg

5.3.1 Variante 0: Referenzgebäude

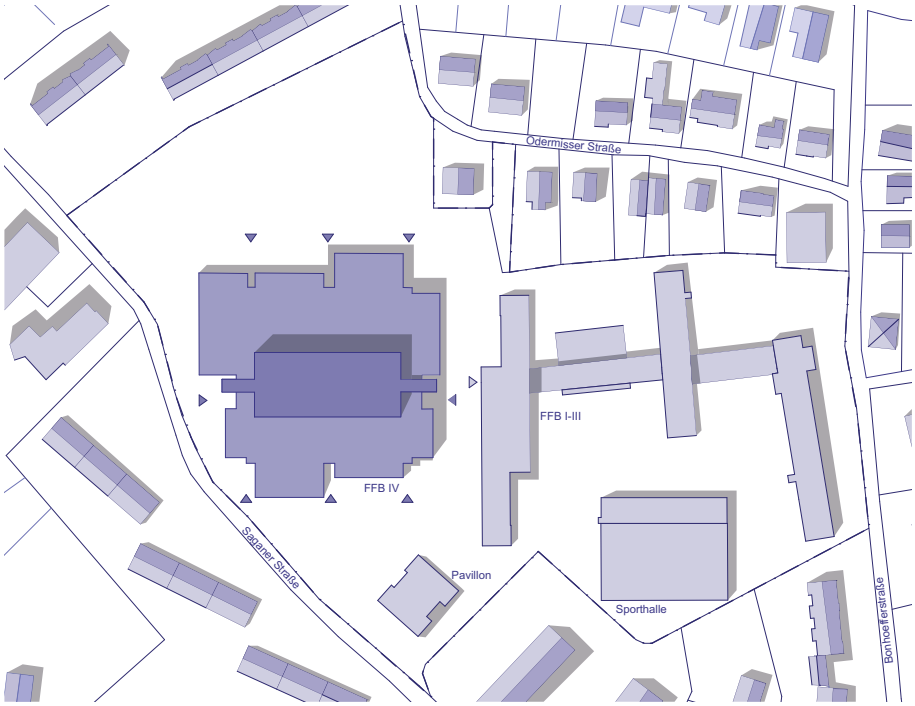


Abb. 99: Lageplan zur Variante 0, maßstabslos

Architektur

Die Variante 0 dient innerhalb der Untersuchungsstruktur als Referenzszenario. Ziel dieser Konfiguration ist es, ein konventionell saniertes Schulgebäude als Ausgangspunkt mit den weiterentwickelten, zirkulär-adaptiven Entwurfsvarianten zu vergleichen. In diesem Szenario wird das bestehende Gebäude FFB IV nicht grundlegend umgestaltet, sondern lediglich hinsichtlich seiner thermischen Hülle saniert. Eine tiefgreifende architektonische Neuordnung findet nicht statt. Auf diese Weise soll verdeutlicht werden, dass eine bloße Verbesserung der Energiekennwerte allein nicht ausreicht, um ein Gebäude als zirkulär und zukunftsfähig zu qualifizieren. Die Bedeutung, den zirkulären Planungsprozess bereits in der frühen Leistungsphase 1 zu integrieren, wird hierdurch umso deutlicher.



Abb. 100:
Grundriss EG zur Variante 0, maßstabslos

FLÄCHENVERTEILUNG IN M²

	EG	UG	OG
KLASSEN	1256	394	267
ÜBUNGSRAUM	1005	585	354
VORBEREITUNG/LAGER	343	1066	0
LEHRER	164	20	236
ERSCHLIESSUNG	692	461	267
GEMEINSCHAFT	1132	0	0
SONSTIGES	343	69	267
GESAMT	**4935**	**2595**	**1576**

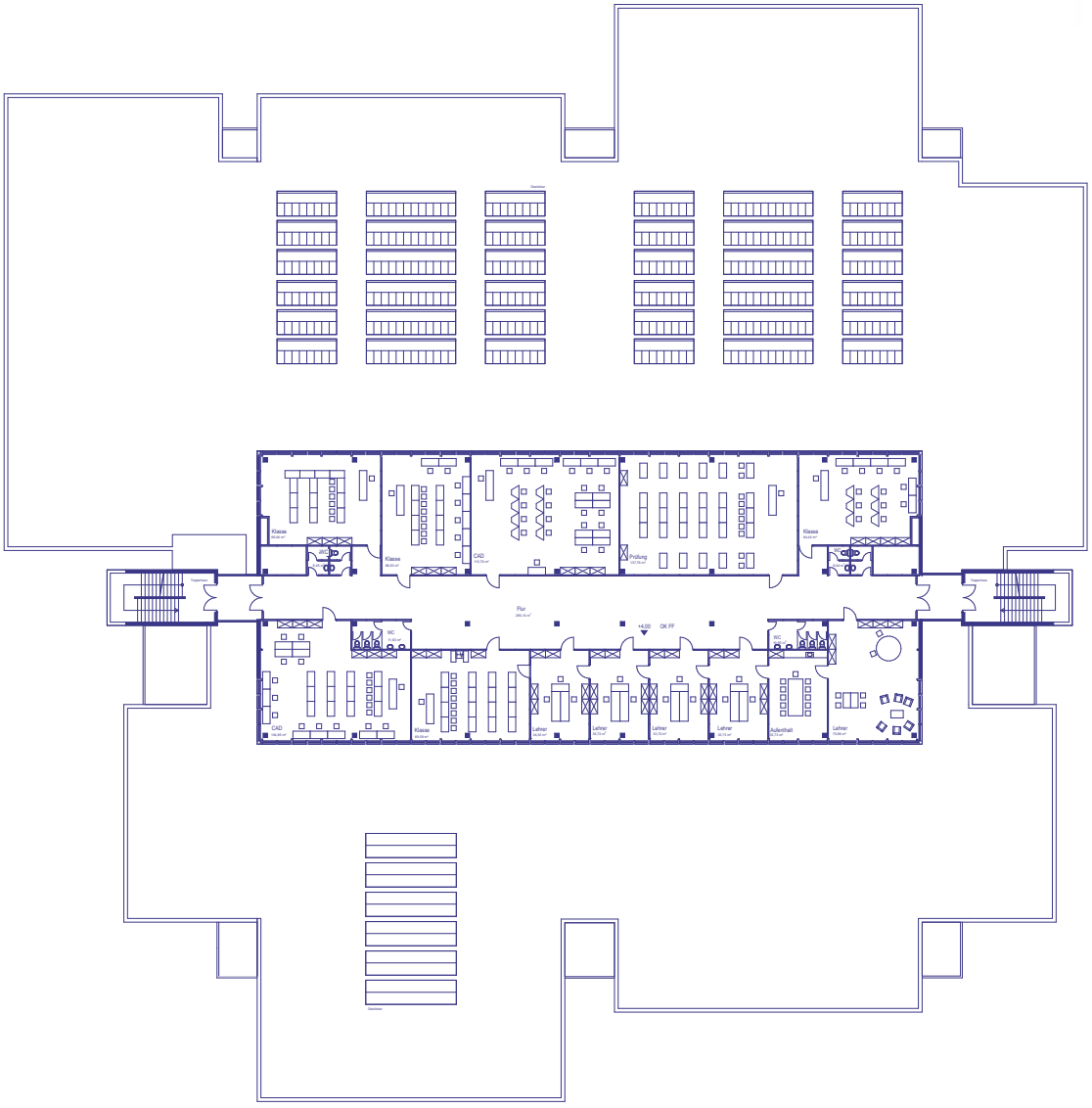


Abb. 101:
Grundriss OG zur Variante 0, maßstabslos

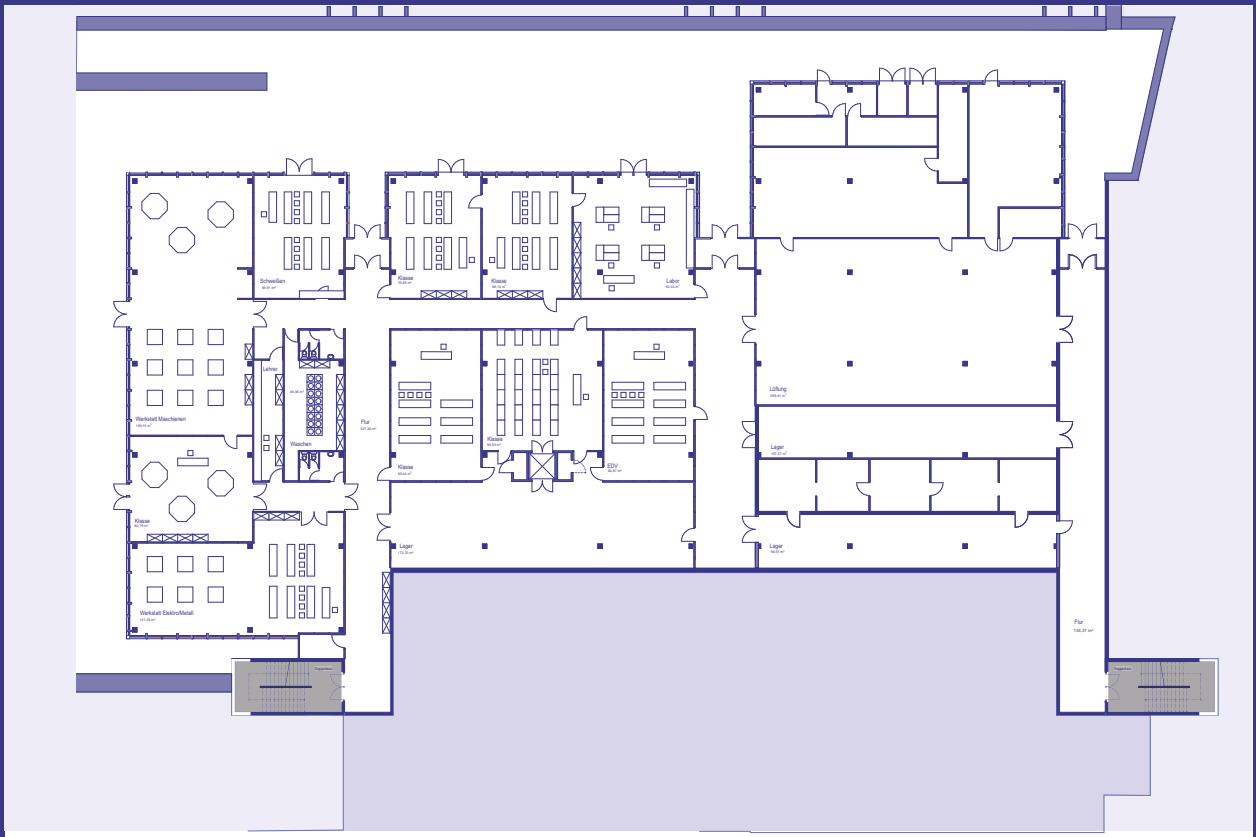


Abb. 102:
Grundriss OG zur Variante 0, maßstabslos

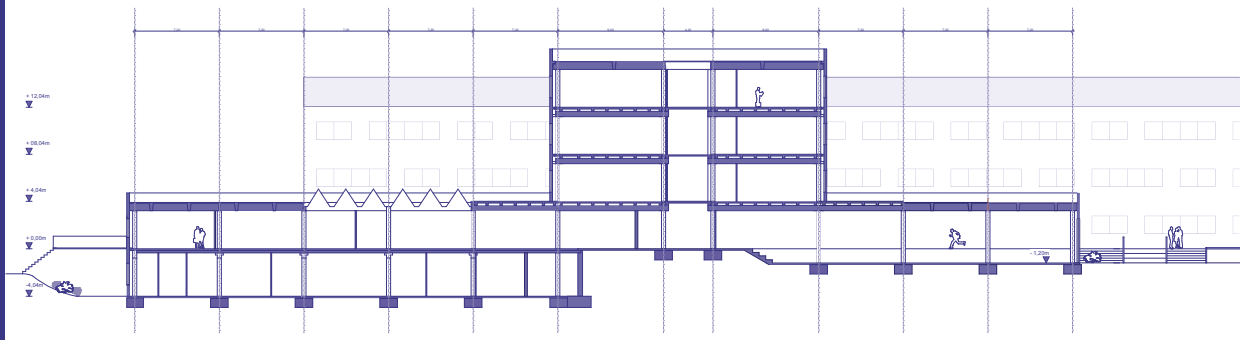


Abb. 103:
Schnitt, maßstabslos

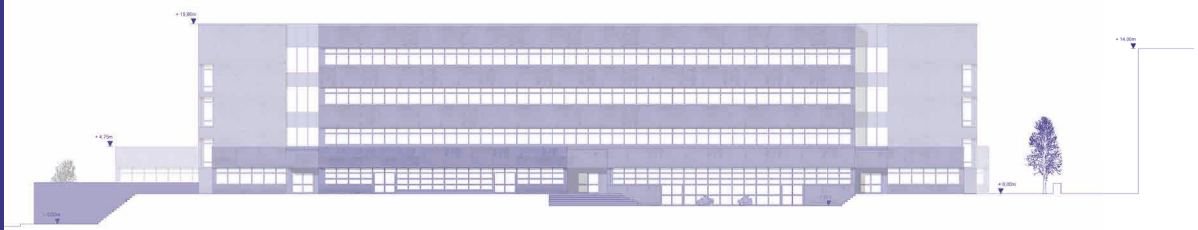


Abb. 104:
Ansicht Süd, maßstabslos

Flächenverteilung

In der Ausgangsverteilung der Flächen zeigt sich eine klassische Organisation als Flurschule. Klassen- und Laborräume machen jeweils etwa 20 % bzw. 22 % der Gesamtfläche aus. Lagerflächen sind mit einem Anteil von 12 % ebenfalls präsent, teilweise direkt an Unterrichtsräume angeschlossen, teils im Erdgeschoss prominent innerhalb der Flurzone oder brachliegend im Untergeschoss (599 m^2), wo vormals die Lüftungszentrale untergebracht war. Aufenthalts- und Lehrerarbeitsräume summieren sich auf ca. 8 %, wobei ihre effektive Nutzbarkeit durch mangelnde Belichtung stark eingeschränkt ist. Gemeinschaftlich genutzte Flächen, etwa das Forum und die Mensa, erreichen 9 %, wobei das Forum in der Praxis kaum genutzt wird. Die Erschließungsflächen nehmen rund 17 % ein, charakteristisch für eine Flurschule, allerdings ohne Aufenthaltsqualität oder visuelle Offenheit. Sanitär- und Backofficeflächen machen die verbleibenden 10 % aus.

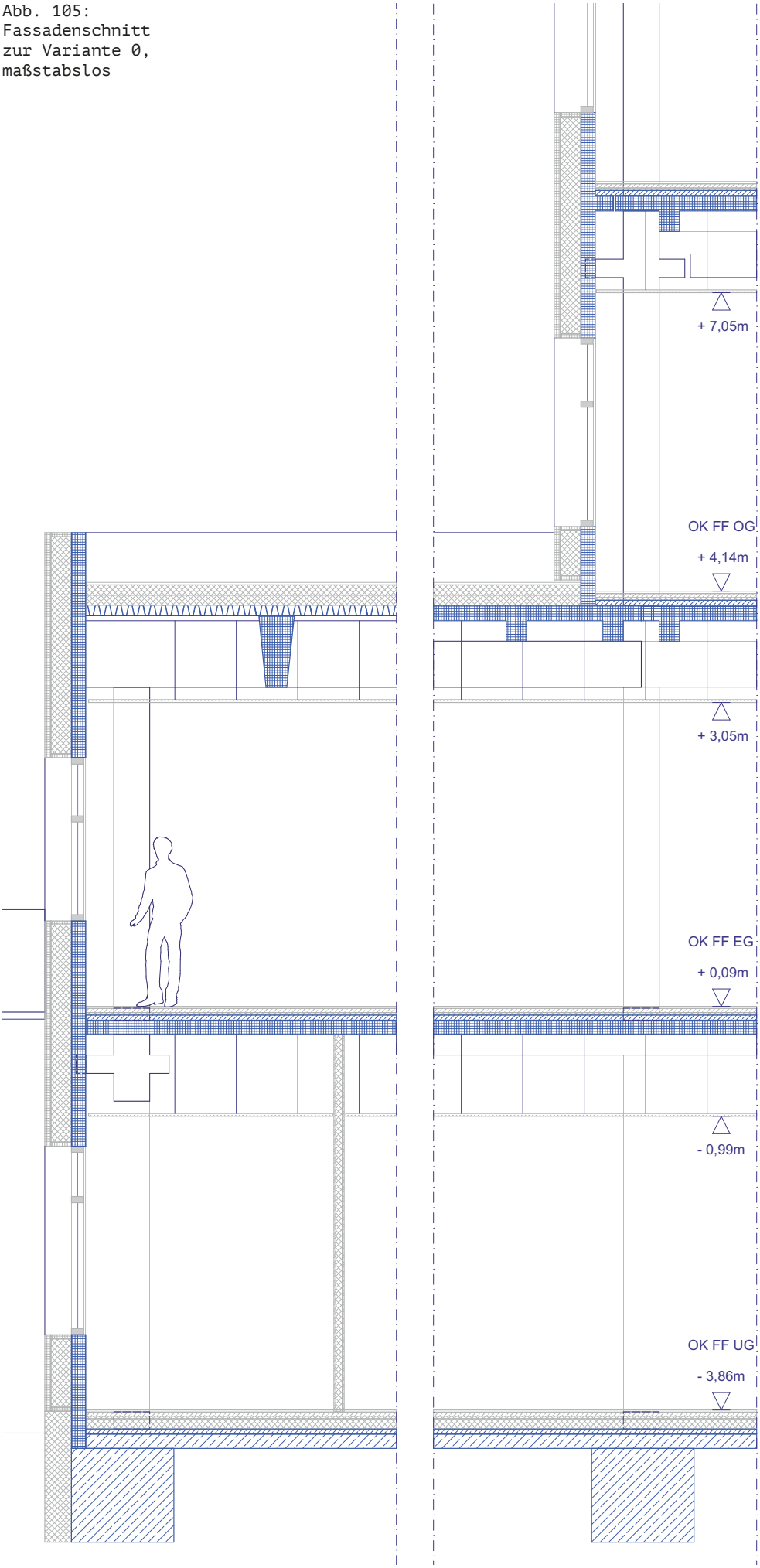
Konstruktion

Die konstruktive Sanierung beruht weitgehend auf der Bestandsstruktur. Die Fassade bleibt in ihrer Tragstruktur bestehen; schadstoffbelastete Dämmungen werden entfernt und durch neue, kraftschlüssig mit einer Betonschicht verbundene Systeme ersetzt. Die Außenwand wird verklebt. Die Bodenplatte bleibt erhalten, wird jedoch mit einer neuen Dämm- und Estrichschicht versehen und abschließend mit PVC belegt. Deckenbereiche erhalten eine neue Trittschalldämmung und einen PVC-Oberbelag. Unterseitig wird eine Metall-Deckenkonstruktion mit akustisch wirksamen Elementen eingebaut. Das Dach erfährt eine klassische Gefälledämmung mit bituminöser Abdichtung. Alle Fenster und Außentüren werden durch neue Elemente ersetzt, während die schadstofffreien Bestandstüren reaktiviert werden. Neue Innenwände werden als Systemtrennwände mit Aluminiumprofilen ausgeführt.

Massen

Die Masseanalyse zeigt, dass 83,90 % der Gesamtmasse auf Beton entfallen. Fenster nehmen 13,29 %, Metall (z. B.

Abb. 105:
Fassadenschnitt
zur Variante 0,
maßstabslos



AUSSENWAND
U= 0,20 W/M²K
STAHLBETON FERTIGTEIL 1
EPS 1
STAHLBETON FERTIGTEIL
REUSE

DACH
U= 0,19 W/M²K

BITUMEN	3
PE-FOLIE	<1
EPS	200
TRAPEZBLECH	150
ABHÄNGESYSTEM ALU	5

DECKEN

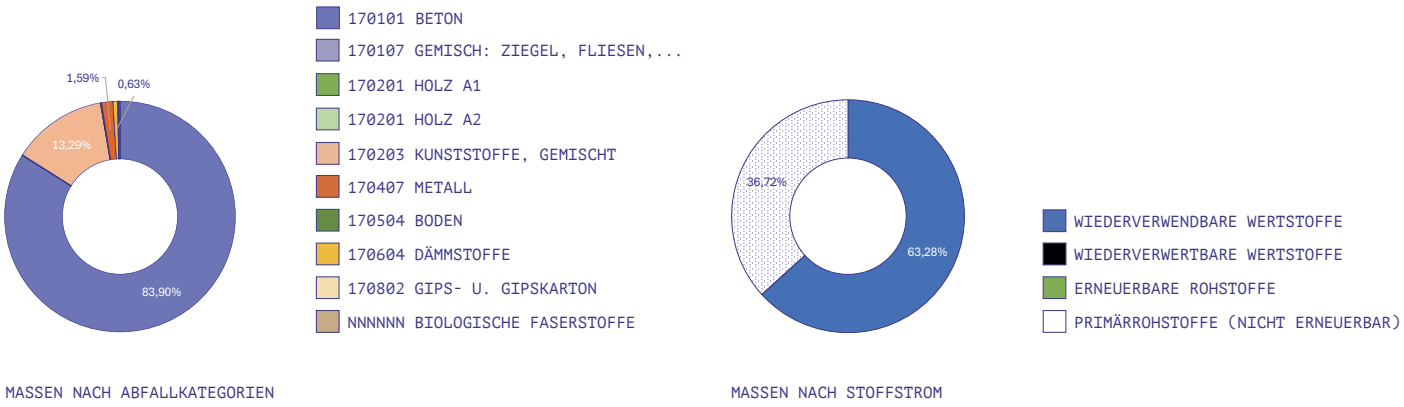
PVC	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL EPS	60
ESTRICH	40
STAHLBETON	100
ABHÄNGESYSTEM ALU	5

INNENWAND

ALUMINIUM	3
MINERALWOLLE	100

BODEN
U= 0,14 W/M²K

PVC	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL EPS	60
EPS	200
ESTRICH	40
GRÜNDUNG STB	200

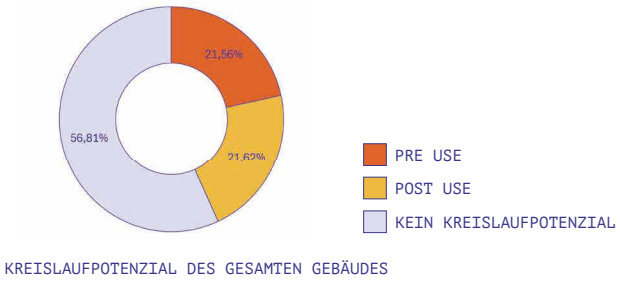


Tab. 14:
Massenbilanz

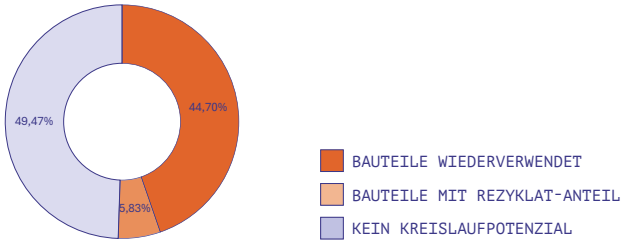
Fensterrahmen, Trapezbleche) 1,59 %, Dämmstoffe lediglich 0,63 % ein. Betrachtet man die stoffliche Herkunft der Materialien, stammen 63,28 % aus dem Bestand, während 36,72 % durch neue, ausschließlich aus Primärrohstoffen bestehende Materialien ergänzt werden.

Zirkularität

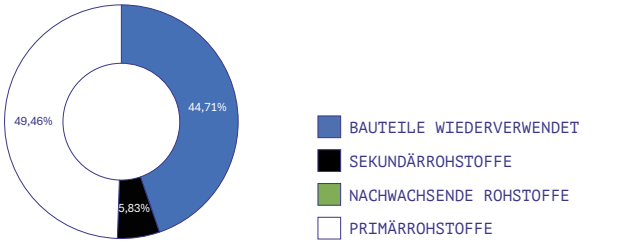
Der CPX-Wert liegt insgesamt bei rund 42,15 %, wobei sich dieser nahezu gleich auf Pre-Use (21,56 %) und Post-Use (21,62 %) verteilt. Im Pre-Use-Anteil ergeben sich 44,70 % aus wiederverwendeten Wertstoffen, 5,83 % aus Bauteilen mit Rezyklatanteil. 49,47 % der Bauteile besitzen kein Kreislaufpotenzial. Post-Use-seitig ergibt sich folgendes Bild: 4,25 % Rezyklierbarkeit, 14,35 % Trennbarkeit, 15,05 % Wiederverwendbarkeit, 13,26 % Demontierbarkeit.
53,08 % der Materialien weisen kein Potenzial für eine zirkuläre Nachnutzung auf.
Die Analyse der Stoffstromkategorien bestätigt diese Werte. Im Pre-Use zeigen sich keine Abweichungen zwischen CPX und stoffstrombasierter Bewertung. Im Post-Use können lediglich 4,29 % der Materialien tatsächlich recycelt werden, 2,00 % thermisch verwertet (nachwachsende Rohstoffe), 26,77 % fossile Rohstoffe ebenfalls thermisch verwertet und 66,93 % müssen deponiert werden.
Die Ursachen lassen sich auf Bauteilebene konkretisieren: Im Bereich der Außenwand werden die Bestandsbetonbauteile positiv bewertet. Neue Bauteile bestehen jedoch aus Primärrohstoffen ohne Rezyklatanteil, mit Ausnahme der Fenster (10 % Altglas). Rezyklierbarkeit erreicht bei keinem Hauptbauteil mehr als 5 % Masseanteil, Trennbarkeit bleibt bei maximal 20 %. Die Wiederverwendung erfolgt überwiegend nur nach professioneller



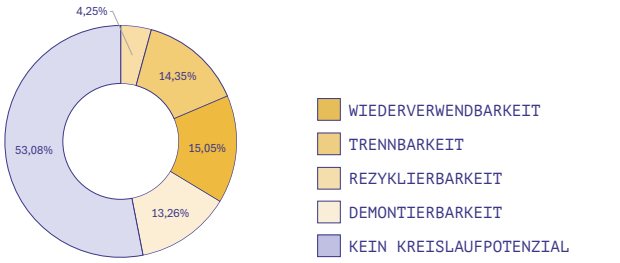
KREISLAUFPOTENZIAL DES GESAMTEN GEBÄUDES



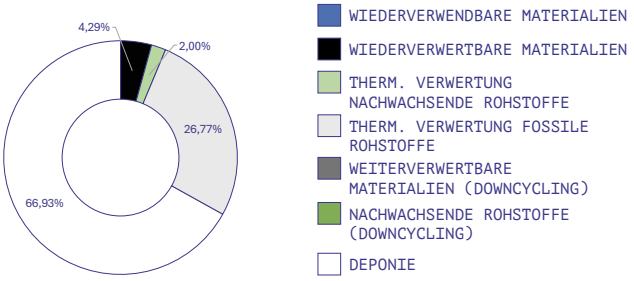
PRE USE - CPX



PRE USE - STOFFSTROM



POST USE - CPX



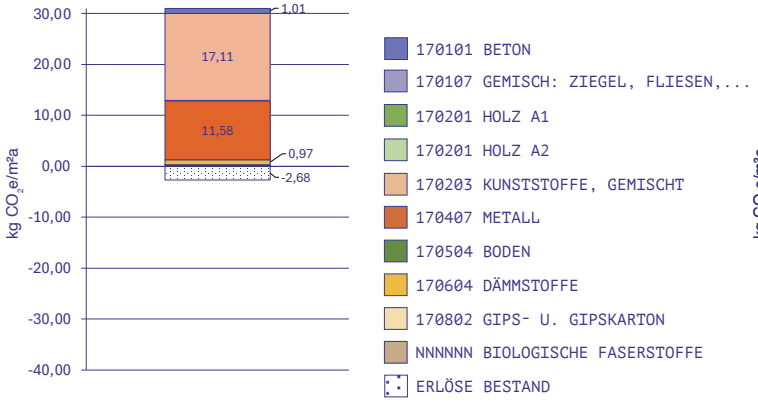
POST USE - STOFFSTROM

Tab. 15: CPX-Bilanz

Aufbereitung (z. B. Recycling von Beton), was den CPX-Wert negativ beeinflusst. Demontierbarkeit ist aufgrund von Verklebung und kraftschlüssiger Verbindung deutlich eingeschränkt. Weitere Einblicke über die exakte Excel Eingabe ist im Anhang zu finden.

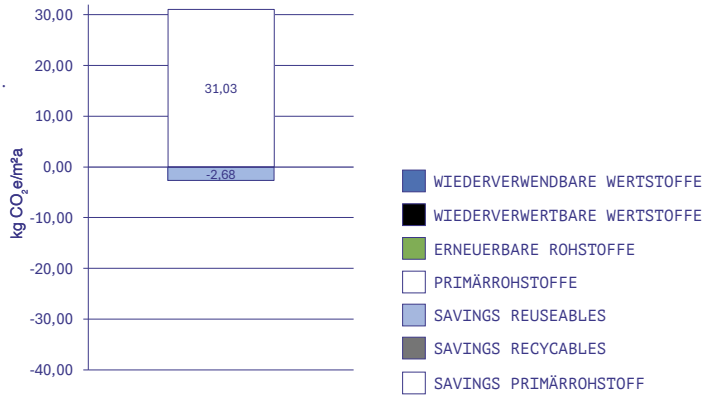
Treibhausgase

Die GWP-Bilanz für das gesamte Gebäude summiert sich auf 31,03 kgCO2e/m2a. Die mit Abstand höchsten Emissionen entfallen auf die neuen Fenster, die mit 17,11 kgCO2e/m2a zu Buche schlagen. Dies liegt nicht nur an der materialintensiven Herstellung, sondern vor allem an dem energieaufwendigen Rückbau, dem Transport sowie der notwendigen Einschmelzung des Glases, das trotz seiner stofflichen Recyclingfähigkeit hohe Rückbauemissionen verursacht. Im Vergleich dazu fällt Beton deutlich geringer ins Gewicht, obwohl er den größten Massenanteil des Gebäudes einnimmt: Für den neu eingebrachten Beton ergeben sich lediglich 1,01 kgCO2e/m2a. Auch die



GESAMT: 31,03 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -2,68 kgCO₂e/m²a

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN



GESAMT: 31,03 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -2,68 kgCO₂e/m²a

GWP NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	GWP total (kg CO_2e)/m2	GWP total (kg CO_2e)/m2*a
170101 Beton	50,64	1,01285893
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0
170201 Holz A1	0,00	0
170201 Holz A2	0,00	0
170203 Kunststoffe, gemischt	0,00	0
170407 Metall	579,20	11,583951
170604 Dämmstoffe	48,59	0,97179308
170802 Gips- u. Gipskarton	0,34	0,00689705
170904 Baumischabfall	15,76	0,31511233
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,00	0
170202 Glas	855,50	17,1100921
170504 Boden	0,00	0
170302 Bitumengemische	1,40	0,02797452
Erlöse Bestand	-134,17	-2,6834027
Gesamt		28,35

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,60
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,16
Primärrohstoff	28,86
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-0,01
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

GWP NACH STOFFSTROM

Tab. 16: GWP-Bilanz

neuen Metalle insbesondere die Aluminiumrahmen tragen unteranderem zu den Emissionen bei, was sich mit ihrer energieintensiven Primärproduktion erklären lässt. Erlöse durch eingesparte Emissionen aus der Bestandsmasse werden mit 2,68 kgCO2e/m2a angerechnet. Diese Einsparungen wurden in einem gestapelten Säulendiagramm in kgCO2e/m2a ausgewiesen, wodurch die Vergleichbarkeit mit Zertifizierungssystemen wie QNG oder DGNB sichergestellt ist. Die Auswertung differenziert die Emissionen zudem nach Abfallkategorien und Stoffstromherkunft, wodurch Rückschlüsse auf die stofflichen Verantwortlichkeiten und Optimierungspotenziale möglich sind. In diesem Fall liegen nur Primärrohstoffe vor und ein paar Einsparungen durch den Bestand.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass über die gesamte Gebäudefläche fast ausschließlich Entsorgungskosten anfallen. Erlöse entstehen nur durch die Verwertung von Metallen (0,94 €/m2). Insgesamt ergibt sich ein negativer Saldo von -44,20 €/m2. Hauptkostentreiber ist Beton mit 33 €/t sowie Dämmstoffe mit 8,40 €/m2, was sich aufgrund des hohen Entsorgungspreises von 1.496 €/t trotz geringer Masseanteile bemerkbar macht. Die aktuellen Marktpreise für Metall (270 €/t) ermöglichen zumindest eine geringe Gutschrift.

Die stoffstrombasierte Betrachtung der Kosten verdeutlicht, dass Einsparungen vorrangig bei Reusables entstehen (z. B. Trapezblech), während Primärrohstoffe durch hohe Entsorgungskosten negativ auffallen. Verwertungskosten betragen 26 €/m2 für wiederverwendete Bauteile und 18 €/m2 für Primärrohstoffe. Bestandsbauteile erzeugen einen positiven Beitrag von 1,35 €/m2.

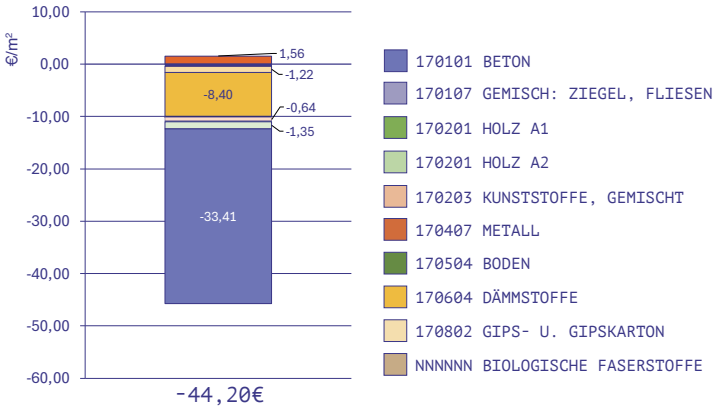
Diese Ergebnisse unterstreichen, dass die Wiederverwendung von Materialien zwar potenziell zur Reduktion von Kosten und Emissionen beitragen kann, jedoch allein nicht ausreicht. Die Integration hochwertiger Rezyklate sowie eine verbesserte Demontierbarkeit sollten im Fokus künftiger Varianten stehen, um die Zirkularität und Ökobilanz signifikant zu verbessern.

Allgemein betragen die kalkulierten Gesamtkosten 8.763.573,80€.

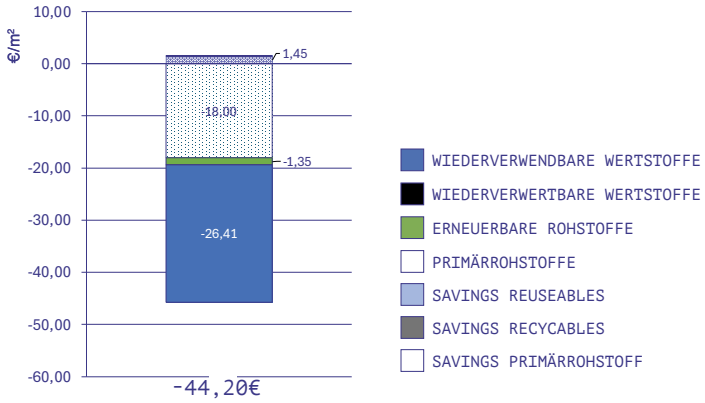
Tab. 17: Kosten-Bilanz

Bauteil	Baukosten (€/gesamt)	Rückbau (€)	Entsorgung (€)	Rückbau- und Entsorgungskosten Rückbau nach 50 Jahren (€/gesamt)	Gesamt (€/gesamt)
Außenwand	887.067,60 €	659.380,54 €	161.729,27 €	821.109,81 €	1.708.177,41 €
Bodenplatte	896.771,84 €	1.209.423,69 €	261.035,40 €	1.470.459,10 €	2.367.230,94 €
Decken	1.078.834,65 €	1.291.032,18 €	158.136,34 €	1.449.168,51 €	2.528.003,16 €
Dach	1.282.826,74 €	835.408,58 €	41.926,97 €	877.335,55 €	2.160.162,29 €

GESAMTKOSTEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
170101 Beton	-33,41
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00
170201 Holz A1	0,00
170201 Holz A2	-1,35
170203 Kunststoffe, gemischt	-0,64
170407 Metall	1,56
170604 Dämmstoffe	-8,40
170802 Gips- u. Gipskarton	-1,22
170904 Baumischabfall	-0,37
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,00
170202 Glas	-0,14
170504 Boden	0,00
170302 Bitumengemische	-0,23
Gesamt	-44,20

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	-26,409382
wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0
Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	-1,3539616
Primärrohstoff	-18,00
Savings Reusables	0,11
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Savings Primärrohstoff	1,45

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM



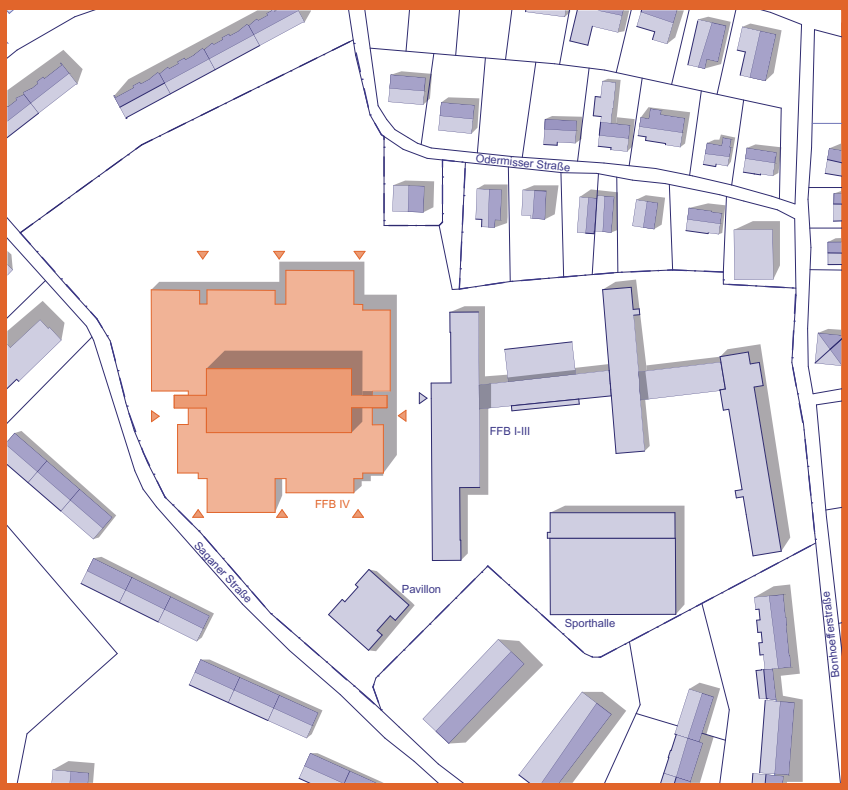
Abb. 106: Perspektive auf den Eingangsbereich

5.3.1 Variante 1: Basis

Architektur

Die Variante 1 verfolgt einen deutlichen architektonischen Entwicklungsschritt, indem sie auf das Prinzip der Lernlandschaften setzt. Ziel ist es, offene und zugleich flexibel nutzbare Flächen zu schaffen, die eine stärkere Vernetzung von Einzel- und Gruppenarbeit ermöglichen. Durch gezielt platzierte Abtrennungen werden funktionale Rückzugsbereiche geschaffen, ohne den offenen Charakter zu verlieren. Diese architektonische Offenheit wird auch konstruktiv genutzt: Tageslicht gelangt nun über seitlich gelegene Fassadenbereiche tief in das Gebäudeinnere, wodurch dunkle Zonen, wie sie in Variante 0 noch vorhanden waren, vermieden werden. Klassenräume, Lager- und Waschräume hingegen bleiben in ihrer Funktion klar abgetrennt.

Innerhalb der neu entwickelten Lernbereiche werden Küchen, Entwicklungslabore, Werkstatt- und Maschinenräume integriert, wodurch eine projektbasierte, pra-



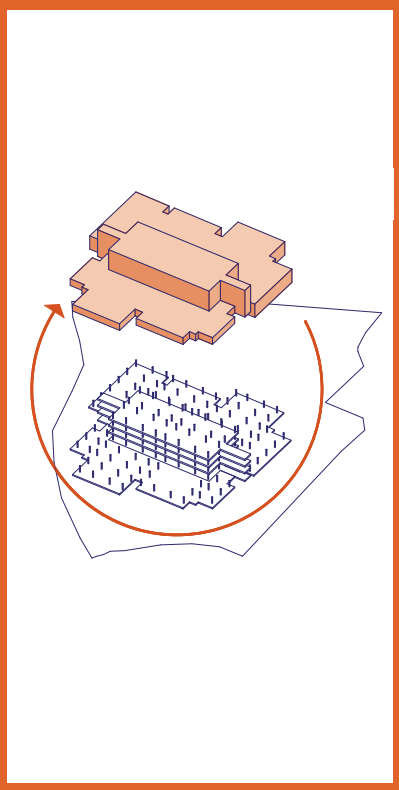


Abb. 107: Lageplan zur Variante 1,

Abb. 108: Piktogramm Varianten Schwerpunkt

xisorientierte Nutzung erleichtert wird. Gemeinschaftsflächen erhalten in dieser Variante eine deutlich höhere Aufenthaltsqualität: Es entstehen räumlich abgetrennte Veranstaltungsbereiche mit Bühnenfunktion sowie eine umstrukturierte Mensa, die durch sinnvolle Trenn- und Lagermöglichkeiten auch für gemeinschaftliche Nutzungen außerhalb der Essenszeiten geöffnet werden kann.

Auch für das Lehrpersonal ergeben sich qualitative Verbesserungen. Ein neu geschaffener Lehrerbereich bietet differenzierte Arbeitsmöglichkeiten, Rückzugsräume sowie eine direkte Anbindung an den Außenraum, wodurch informelle Austauschzonen entstehen. Besonders das Untergeschoss wird funktional aufgewertet: Der ehemalige Technikraum wird in die pädagogische Nutzung integriert. Gleichzeitig entstehen dort neue Gemeinschaftsbereiche, die durch Tageslicht von oben belichtet werden. In den Obergeschossen wird der Flurbereich stärker geöffnet, wodurch eine visuelle und funktionale Verbindung zwischen Flur und angrenzenden Nutzungen entsteht. Zusätzlich werden Nischen für Gruppen-

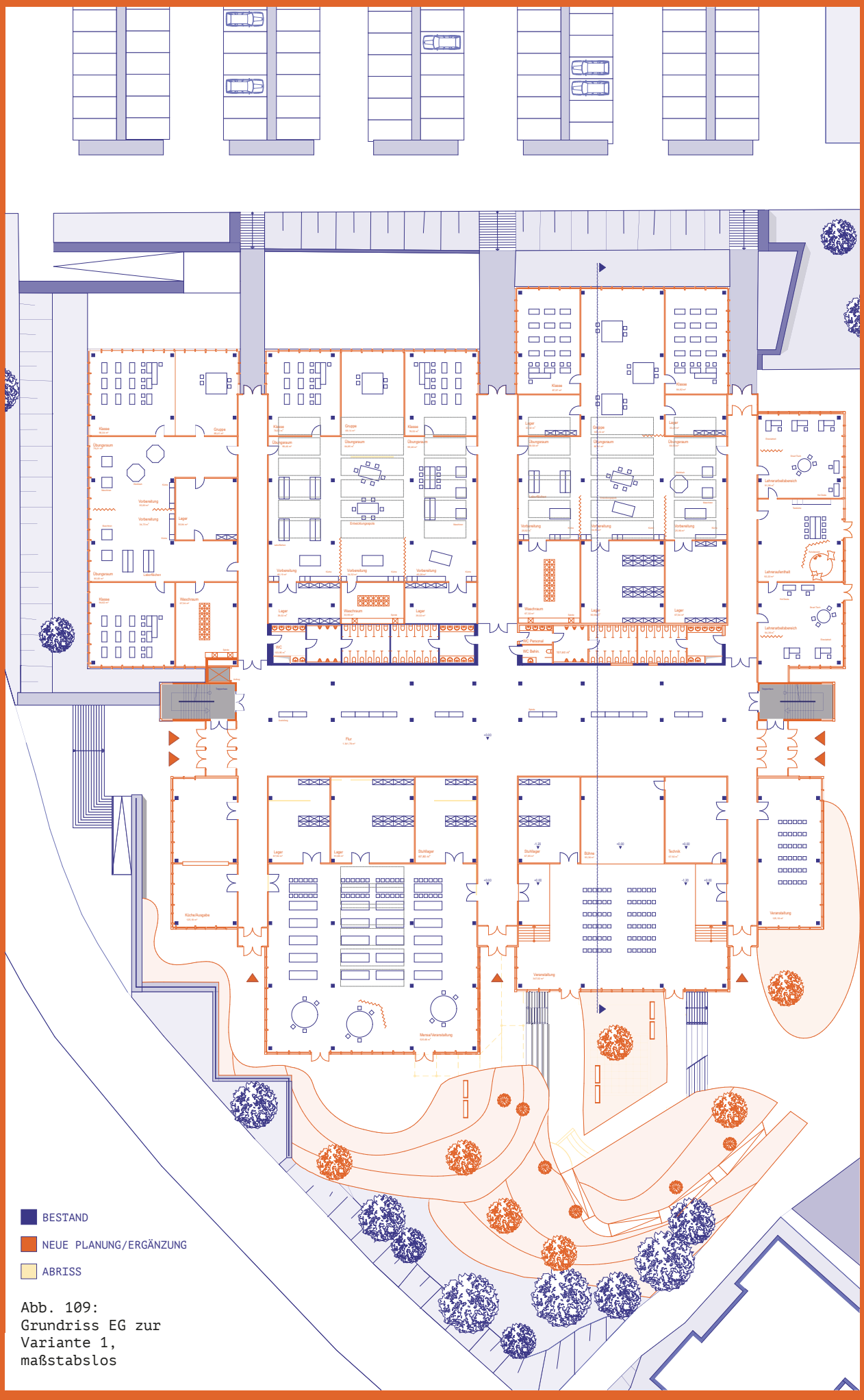


Abb. 109:
Grundriss EG zur Variante 1, maßstabslos

FLÄCHENVERTEILUNG IN M²

	EG	UG	OG
KLASSEN	817	675	462
ÜBUNGSRAUM	639	521	271
VORBEREITUNG/LAGER	533	210	43
LEHRER	545	229	43
ERSCHLIESSUNG	1341	600	183
GEMEINSCHAFT	1091	0	138
SONSTIGES	496	377	33
GESAMT	**5462**	**2612**	**1173**

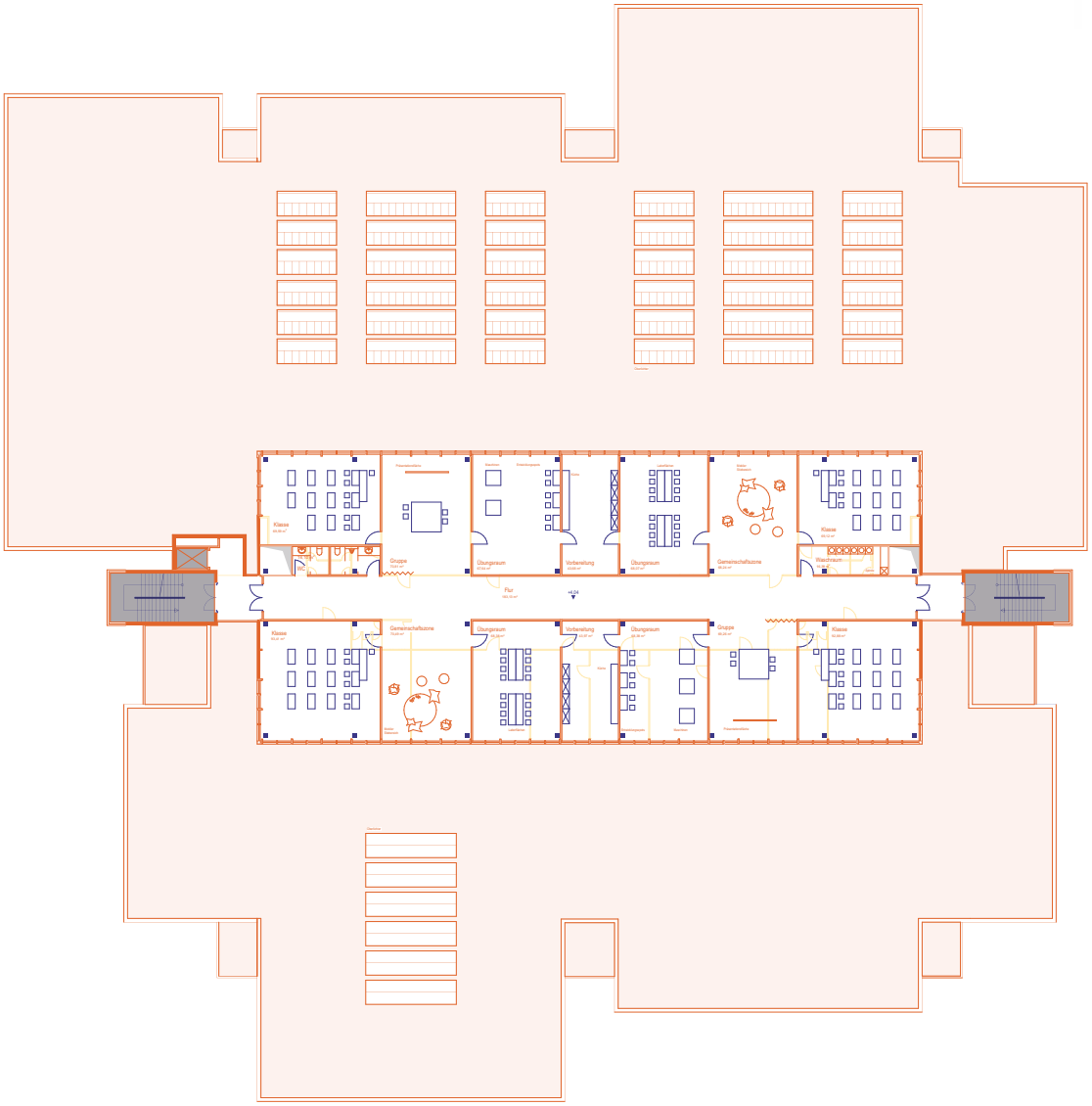


Abb. 110:
Grundriss OG zur
Variante 1,
maßstabslos

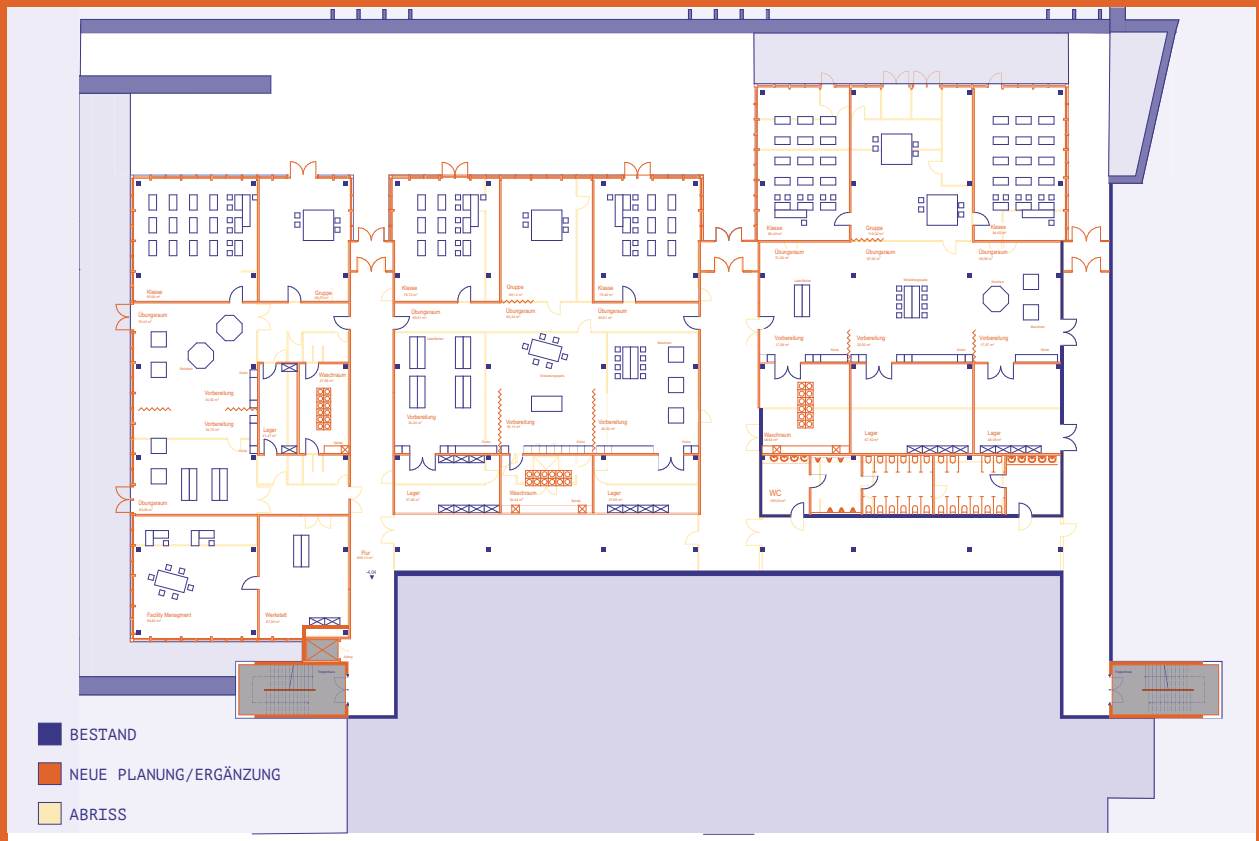


Abb. 111:
Grundriss OG zur Variante 1, maßstabslos

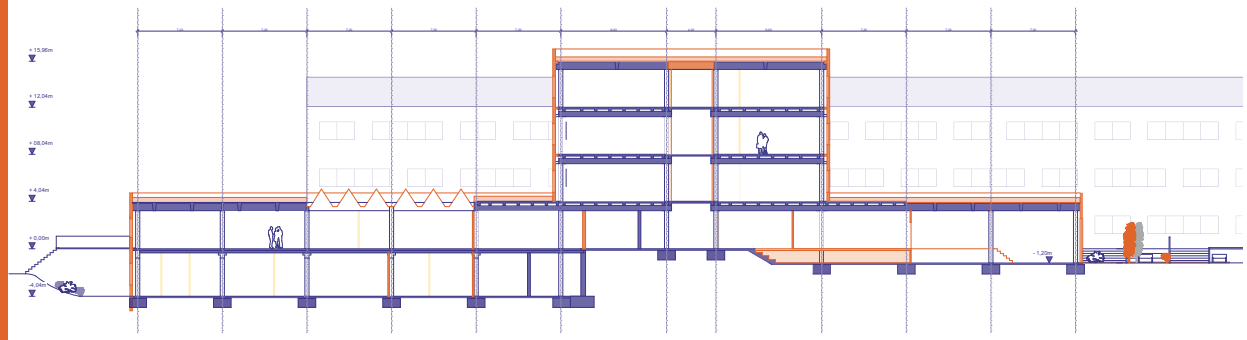


Abb. 102:
Schnitt, maßstabslos

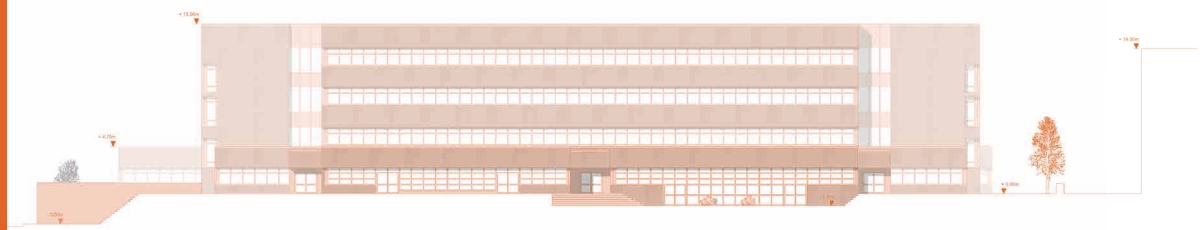


Abb. 113:
Ansicht Süd, maßstabslos

arbeiten und Präsentationen eingeführt, die den offenen Lerncharakter stärken.

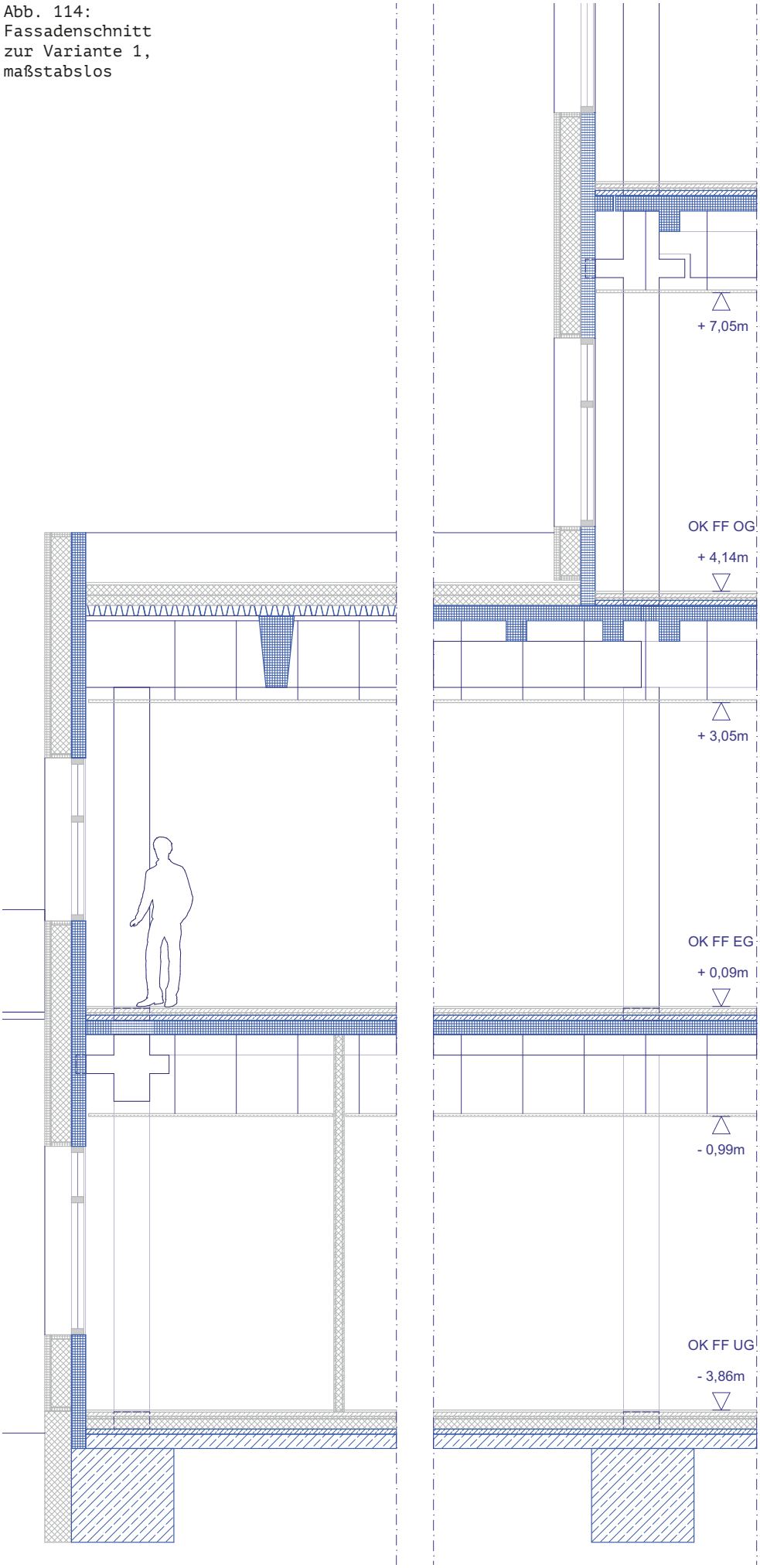
Die Barrierefreiheit wird sowohl im Innen- als auch im Außenraum umfassend sichergestellt: Ein Aufzug wird entlang des linken Treppenhauses ergänzt, im Außenbereich sorgen neue Rampenanlagen für eine stufenlose Erschließung.

Im Außenraum wird die bestehende Terrassierung des Geländes organisch aufgenommen und räumlich entgrenzt. Statt starrer Mauern und Einteilungen treten fließende Übergänge mit großzügigen Grünflächen. Die Freiraumgestaltung orientiert sich an den landschaftlichen Prinzipien des angrenzenden FFB III und setzt dessen organisch geschwungene Formensprache fort. Ziel ist eine signifikante Reduktion des Versiegelungsgrades und eine damit verbundene Steigerung der Aufenthaltsqualität im Außenbereich.

Konstruktion

Die konstruktive Ausgestaltung der Variante 1 steht im Zeichen eines maximierten Reuse-Anteils. Ziel dieser Strategie ist es, das Wiederverwendungspotenzial baulicher Komponenten systematisch auszuschöpfen und gleichzeitig deren Auswirkungen auf zirkularitätsrelevante Bewertungsbereiche – wie Masse, GWP oder Wirtschaftlichkeit – transparent zu machen. Im Fokus steht dabei nicht nur die rein technische Integration wiederverwendeter Bauteile, sondern auch eine kritische Auseinandersetzung mit deren tatsächlicher Verfügbarkeit am Markt. Dort, wo ein nachweisbarer Zugriff auf gebrauchte Bauteile in ausreichender Menge möglich war – etwa über Bauteilbörsen wie Concular oder spezialisierte Rückbauprojekte –, wurde deren Einsatz als Planungsprämisse gesetzt. In Fällen, in denen die Marktsituation oder sicherheitstechnische Anforderungen den Reuse ausschlossen, wurde auf herkömmliche Bauteile zurückgegriffen, die dann jedoch gemäß Standard mit Primärrohstoffen oder ggf. mit marktüblichen Rezyklatanteilen bemessen wurden. Auf diese Weise wird in dieser Variante gezielt überprüft, welchen Beitrag die Wiederverwen-

Abb. 114:
Fassadenschnitt
zur Variante 1,
maßstabslos



AUSSENWAND
U= 0,19 W/M²K

ALUMINIUM	3
UPE 160 TRÄGER	
PE FOLIE	<1
MINERALWOLLE	200
STAHLBETON	140

DACH
U= 0,19 W/M²K

GRANULAT GRÜNDACH	3
PE-FOLIE	<1
MINERALWOLLE	200
TRAPEZBLECH	150
ABHÄNGESYSTEM GIPS	5

DECKEN

FLIESE	15
KORKUNTERLAGE	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL MINERAL	60
ESTRICH	40
STAHLBETON	100
ABHÄNGESYSTEM ALU	5

INNENWAND

HOLZ	22
MINERALWOLLE	100

BODEN
U= 0,14 W/M²K

FLIESE	15
KORKUNTERLAGE	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL MINERAL	60
MINERALWOLLE	200
ESTRICH	40
GRÜNDUNG STB	200

dung tatsächlich leisten kann und wo ihre gegenwärtigen Grenzen liegen.

Die Außenwandkonstruktion folgt dieser Logik in besonderer Weise: Hier kommen regional verfügbare Wellblech-Elemente zum Einsatz, die ursprünglich an Industriegebäuden verbaut waren. Nach einem Rückbau und entsprechender Aufbereitung werden diese als Fassadenelemente am FFB IV erneut eingesetzt. Diese Wiederverwendung vereint ökologisches Potenzial mit einer hohen gestalterischen Prägnanz und verweist auf industrielle Zirkularitätspraktiken. In Hinblick auf die Dämmung konnte dagegen keine relevante Verfügbarkeit von wiederverwendbarer Dämmmasse nachgewiesen werden – ein Umstand, der sich auch aus den gängigen Schadstoffbelastungen und hygroskopischen Materialeigenschaften ergibt. Es muss eine Prüfung bei derartigen Baustoffen unbedingt mit vorgesehen sein, was den Planungsaufwand erhöht und auch andere Folgen entsprechend bedingt. Daher wurde an dieser Stelle auf neue Dämmstoffe zurückgegriffen, die jedoch standardmäßig über einen Rezyklatanteil verfügen. Besonders bei mineralischen Dämmstoffen wie Mineralwolle liegt dieser Anteil produktionsbedingt oft bei bis zu 50 %, was im Sinne der Pre-Use-Bewertung positiv zu Buche schlägt.

Im Bereich der nichttragenden Innenwände, insbesondere bei den Systemtrennwänden, konnte über die Plattform von Concular eine größere Menge gebrauchter Bauteile identifiziert werden, die aus dem Fraunhofer-Institut Stuttgart stammen. Dabei handelt es sich um Trennwandsysteme mit Holzwerkstoffplatten, die weiß gestrichen sind und ein typisches Maßraster bedienen. Ergänzt werden diese durch neue Dämmstoffe (Mineralwolle), die gemäß den Anforderungen an den Schallschutz verbaut werden. Diese Kombination aus wiederverwendeter Struktur und neuer, funktionaler Ergänzung spiegelt beispielhaft die hybride Logik zirkulären Bauens wider.

Im Bereich der Bodenplatte wird das Reuse-Prinzip ebenfalls gezielt angewendet: Während tragende Schichten

und Dämmstoffe weiterhin durch neue Materialien ersetzt werden müssen, lassen sich die Oberflächen in Form von wiederverwendeten Bodenfliesen realisieren. Diese finden sich in standardisierten Mengen und Qualitäten über Bauteilbörsen wie Concular und lassen sich ohne tiefgreifende Umgestaltung in das Bestandsraster einpassen. Ähnlich verhält es sich bei den Deckenaufbauten: Auch hier wird auf einen kombinierten Aufbau aus wiederverwendeten Fliesen und primärstoffbasierten Schichten gesetzt. Zusätzlich kommt eine abgehängte Decke zum Einsatz, die – ebenfalls aus dem Bestand des Fraunhofer-Instituts – als Reuse-Element erneut integriert wird. Die verwendeten Gipsbauplatten erfüllen dabei sowohl die technischen als auch gestalterischen Anforderungen eines modernen Innenausbaus.

Im Bereich der Dachkonstruktion zeigt sich die Herausforderung zirkulärer Planung besonders deutlich: Zwar konnten vereinzelt wiederverwendbare Dämmplatten über Rückbauprojekte identifiziert werden, diese stehen jedoch nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Darüber hinaus müssen bei Dämmmaterialien besonders hohe Anforderungen an Hygiene, Brandschutz und bauphysikalische Eigenschaften erfüllt werden. Daher wird in der Planung davon ausgegangen, dass eine Wiederverwendung nur dann realistisch ist, wenn neben der eigentlichen Aufbereitung auch ein umfassendes Prüfverfahren implementiert wird. Vor diesem Hintergrund wird auch bei der Variante 1 für die Dachdämmung primär auf neue Produkte zurückgegriffen, jedoch stets mit dem Ziel, diese Entscheidung im Kontext realer Verfügbarkeiten und regulatorischer Machbarkeit begründet zu treffen.

Insgesamt zeigt sich in der Variante 1 ein komplexes, aber bewusst gesteuertes Zusammenspiel von Wiederverwendung und gezieltem Neueinsatz.

Flächenverteilung

In der Variante 1 wurde die innere Organisation des Gebäudes gezielt überarbeitet, um auf funktionale wie pädagogische Anforderungen zukunftsgerichtet zu reagie-

ren. Im Fokus stand dabei eine ausgewogenere Differenzierung der Flächennutzungen unter besonderer Berücksichtigung flexibler Lernbereiche, gemeinschaftlicher Nutzungsmöglichkeiten sowie einer optimierten Flächenverteilung im Bestand. Dies spiegelt sich auch quantitativ in den Flächenkennzahlen wider, die im Rahmen der Analyse erfasst und ausgewertet wurden.

So wurde der Anteil der klassischen Klassenräume gegenüber der Ausgangsvariante auf insgesamt 26 % der Gesamtfläche erhöht. Diese Anpassung geht mit einer bewussten Reduzierung der Übungs- und Laborflächen einher, deren Anteil in Variante 1 bei 17 % liegt. Ziel dieser Verschiebung ist eine stärkere Gewichtung individualisierter Unterrichtsformen und Gruppenarbeit, die über die neu konzipierten Lerncluster realisiert werden. Der Rückgang der Übungsräume stellt dabei keine Einschränkung dar, sondern wird kompensiert durch die erhöhte Flexibilität und Nutzungsvielfalt der offenen Lernbereiche, die auf gemeinsame Nutzung durch unterschiedliche Gruppen ausgelegt sind.

Ein weiterer Punkt betrifft die Lagerflächen. Ihr Anteil liegt in Variante 1 bei 8 %, was im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration eine Reduktion darstellt. Diese Entwicklung ist vor allem auf die Reaktivierung und Nutzbarmachung des ehemaligen Technikbereichs im Untergeschoss zurückzuführen, der nun als regulärer Lern- und Unterrichtsraum genutzt wird. Allerdings weist die Lagerflächenverteilung in dieser Variante eine Besonderheit auf: Rund 200 m² Fläche müssen nach wie vor als Lager deklariert werden, obwohl sie funktional anders gewidmet sein könnten. Grund dafür ist die mangelhafte natürliche Belichtung in bestimmten Gebäudeteilen, die eine Umnutzung zu vollwertigen Lehrräumen unter den geltenden Schulbaurichtlinien ausschließt. Der Zugewinn an Nutzfläche im Untergeschoss gleicht diesen planerischen Kompromiss jedoch weitgehend aus.

Der Flächenanteil für Lehrerarbeitsplätze bleibt mit 8 % konstant, erfährt jedoch eine qualitative Aufwertung. In Variante 1 werden den Lehrkräften separate Arbeitsbereiche mit Außenraumbezug und gemeinschaftlichen Kommunikationszonen zugewiesen, was der sozialen und funktionalen Qualität des Arbeitsplatzes zugutekommt. Die Erschließungsflächen verzeichnen dagegen einen Anstieg auf 21 %. Diese Steigerung resultiert aus der strukturellen Reorganisation der Flurzonen, in denen

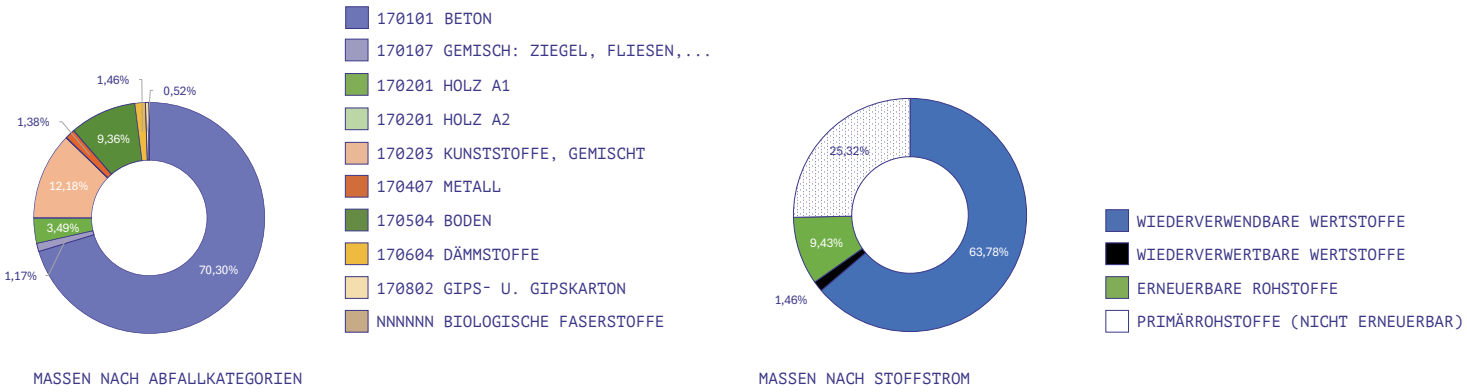
zuvor zum Teil Lagerflächen untergebracht waren, die nun wieder ihrer originären Funktion als Bewegungs- und Begegnungsräume zugeführt werden.

Eine ebenfalls auffällige Entwicklung zeigt sich bei den Gemeinschaftsflächen. Ihr Anteil konnte in Variante 1 von ursprünglich 9 % auf nunmehr 12 % erhöht werden. Ausschlaggebend dafür ist die Umstrukturierung der vorderen Erdgeschossbereiche, in denen vormals wenig genutzte Flächen nun als multifunktionale Räume für schulische und außerschulische Veranstaltungen aktiviert wurden. Besonders hervorzuheben ist die neue räumliche Trennung zwischen öffentlich zugänglichen gemeinschaftlichen Bereichen im Vorderhaus und schulisch-internen Flächen im rückwärtigen Gebäudeteil, wodurch ein ausgewogenes Maß an Transparenz und Sicherheit gewährleistet wird.

Abschließend ist der Anteil der sonstigen Flächen mit 8 % zu benennen. Dieser umfasst erweiterte Sanitärbereiche, neue Waschräume sowie Flächen für das Facility Management, die im Zuge der funktionalen Aufwertung und Umstrukturierung des Gebäudes erforderlich wurden. Die integrative Planung dieser Nebenflächen unterstreicht den Anspruch, sämtliche Gebäudebereiche – auch jenseits der primären Unterrichtsflächen – funktional und zirkulär zu optimieren.

Massen

Die massenbezogene Analyse der Variante 1 verdeutlicht die signifikanten Materialverschiebungen, die sich aus dem Fokus auf Wiederverwendung und Recyclingfähigkeit ergeben. Insgesamt entfallen rund 70,30 % der gesamten Bauteilmasse auf Betonbauteile, sowohl in Form von erhaltenen Bestandsstrukturen als auch durch ergänzende Maßnahmen mit neuen Betonelementen. Der Beton bleibt somit weiterhin der dominanteste Massenbestandteil des Gebäudes und stellt damit einen zentralen Hebel in der zirkulären Bewertung dar, insbesondere im Kontext seiner Wiederverwendung im Bestand und seiner begrenzten Rezyklierbarkeit in der Neumaterialverwendung.



Tab. 18: Massen-Bilanz

Die eingesetzten Bodenbeläge in Form von Fliesen schlagen mengenmäßig mit rund 1,17 % zu Buche. Diese verhältnismäßig geringe Masse steht jedoch exemplarisch für die Strategie dieser Variante, gezielt wiederverwendbare Bauteile aus vorhandenen Bauteilbörsen (etwa Concular) in das neue Konzept zu integrieren, wodurch sich sowohl stoffliche als auch ökologische Vorteile ergeben. Ebenfalls hervorzuheben sind die Holzwerkstoffe der Abfallkategorie A1 mit 3,49 %. Sie erreichen durch die umfassende Integration von wiederverwendeten Systemtrennwänden, die wie gesagt maßgeblich unter anderem aus dem Fundus des Fraunhofer Instituts in Stuttgart sind, eine erhebliche Bedeutung. Diese Holzwerkstoffe tragen nicht nur zur Masse bei, sondern ermöglichen durch ihre stoffliche Herkunft aus Reuse-Kontexten auch eine hohe Qualität in der stoffstrombasierten Nachhaltigkeitsbewertung.

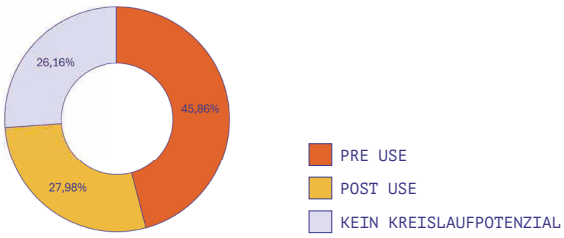
Ein Masseanteil von 12,18 % entfällt auf Fenster und angrenzende Fassadenelemente. Diese beinhalten neben Glaskomponenten auch einen erheblichen Metallanteil, der anteilig auf die neuen Rahmenkonstruktionen zurückzuführen ist. Damit wirken sich die Fenster, ähnlich wie bereits in Variante 0, sowohl auf die Masse als auch auf die stofflichen Emissionen und Kosten wesentlich aus.

Neu hinzugekommen ist in Variante 1 ein relevanter Masseanteil aus dem Bereich der Dachbegrünung. Rund 9,36 % der Gesamtkonstruktion lassen sich auf mineralische Materialien der Abfallkategorie „Boden“ zurückführen, die für den Aufbau des extensiven Gründachs

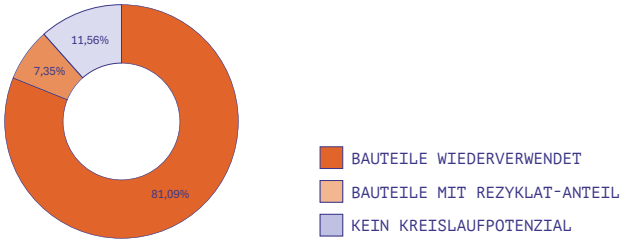
verwendet werden. Diese Maßnahme ist nicht nur aus funktional-klimatischer Sicht bedeutsam, sondern vergrößert auch die Diversität der verwendeten Materialien und deren Rückführbarkeit in natürliche Stoffkreisläufe.

Die Dämmstoffe weisen gegenüber der Ausgangsvariante eine leichte Zunahme auf und erreichen einen Anteil von 1,46 %. Die Ursache liegt insbesondere in der thermischen Ertüchtigung des vormals ungenutzten Untergeschosses, das in Variante 1 aktiv in die Nutzungsstruktur einbezogen wurde und daher erstmals entsprechend gedämmt werden musste. Zusätzlich wurden auch im Dachbereich Reuse-Dämmplatten berücksichtigt, sofern sie in ausreichender Menge über Bauteilbörsen verfügbar waren. Die Massezunahme resultiert somit sowohl aus quantitativer Flächenvergrößerung als auch aus veränderter stofflicher Auswahl. Die Gipsbaustoffe, die unter anderem in den abgehängten Decken zum Einsatz kommen, machen 0,52 % der Gesamtmasse aus und sind hauptsächlich auf die wiederverwendeten Gipsplatten aus dem Fraunhofer-Bestand zurückzuführen.

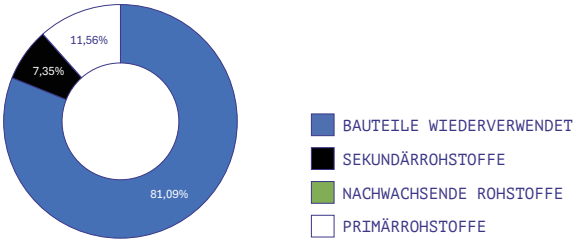
Im Rahmen der Stoffstromanalyse zeigt sich, dass durch die gezielte Integration von wiederverwendbaren und recyclingfähigen Komponenten erhebliche Verschiebungen im Materialursprung erreicht werden konnten. Neben den bereits bekannten Bestandsmassen, insbesondere der Stahlbetonstruktur, konnten in Variante 1 rund 19,07 % der gesamten Materialmasse als recyclingfähige Wertstoffe klassifiziert werden – eine signifikante Steigerung im Vergleich zur Ausgangsvariante. Zusätzlich werden 9,43 % der Bauteilmasse durch nachwachsende Rohstoffe gebildet, insbesondere in Form von Holzwerkstoffen, die sowohl funktional als auch ökologisch hohe Potenziale aufweisen. Die Verwendung reiner Primärstoffe hingegen konnte auf 25,32 % reduziert werden. Diese Verschiebung unterstreicht das grundlegende Ziel der Variante 1, das Reuse-Potenzial systematisch auszuschöpfen und so die stoffliche Qualität der Materialflüsse zu maximieren.



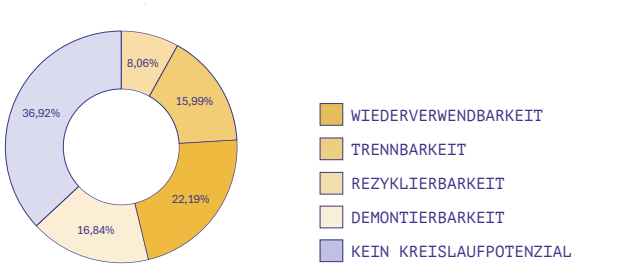
KREISLAUFPOTENZIAL DES GESAMTEN GEBÄUDES



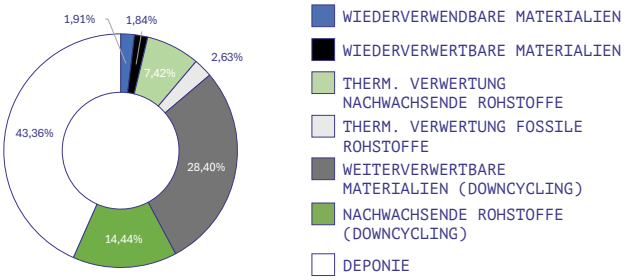
PRE USE - CPX



PRE USE - STOFFSTROM



POST USE - CPX



POST USE - STOFFSTROM

Tab. 19:
CPX-Bilanz

Zirkularität

Im Rahmen der Zirkularitätsanalyse erreicht Variante 1 einen deutlich verbesserten Gesamt-CPX-Wert von 73,84 %. Dieser verteilt sich auf 45,86 % aus der Pre-Use-Phase sowie 27,98 % aus der Post-Use-Phase. Das Ergebnis reflektiert die gezielte Anwendung einer Planungsstrategie, die die Wiederverwendung von Bauteilen in den Fokus rückt und durchgängig auf vorhandene ReUse-Potenziale zurückgreift, wann immer es marktbasiert und konstruktiv möglich war.

In der Pre-Use-Phase zeigt sich ein besonders optimales Ergebnis. Rund 81,09 % der zirkularitätsrelevanten Beiträge lassen sich auf die Integration wiederverwendeter Bauteile zurückführen. Diese umfassen unter anderem

die Fassadenverkleidung aus rückgebautem Wellblech, Systemtrennwände aus Holzwerkstoffen sowie wiederverwendete Gipsplatten und Fliesen. Hinzu kommen etwa 7,35 % aus Bauteilen mit dokumentiertem Rezyklatanteil, beispielsweise bei der eingesetzten Mineralwolldämmung. Damit verbleiben lediglich 11,56 % der Materialien ohne Kreislaufpotenzial, was einen erheblichen Fortschritt im Vergleich zur Referenzvariante darstellt.

Auch im Bereich der Post-Use-Zirkularität konnten relevante Verbesserungen erzielt werden. Während in der Ausgangsvariante noch 53 % der Materialien als nicht kreislauffähig bewertet wurden, ist dieser Anteil in Variante 1 auf 11,56 % gesunken. Gleichwohl bleibt das Ergebnis hinter den hohen Werten der Pre-Use-Phase zurück. Die stoffstrombasierte Analyse zeigt, dass sich zwar theoretisch günstige Rückbaupotenziale (laut CPX) abzeichnen, diese in der praktischen Umsetzung jedoch nicht vollständig in stofflich verwertbare Rückführungswege übersetzen lassen.

Dies wird besonders deutlich, wenn die Rückführungspfade im Post-Use differenziert betrachtet werden: Etwa 1,91 % der Materialien können tatsächlich als Reusables in gleicher Form erneut eingesetzt werden, während weitere 1,84 % in ein stoffliches Recycling auf gleichem Qualitätsniveau überführt werden können. Rund 7,42 % thermisch verwertbare Materialien stammen aus nachwachsenden Rohstoffen (wie Holzwerkstoffen), während etwa 2,63 % fossile Materialien (z. B. bestimmte Dämmstoffe) ebenfalls thermisch verwertet werden können. Den größten Anteil im Bereich des Downcyclings, womit also einer stofflichen Wiederverwertung unter Qualitätsverlust gemeint ist, machen etwa 28,40 % weiterverwertbare Materialien im Allgemeinen und bei dem 14,44 % der nachwachsenden Rohstoffe aus. Diese unterliegen aufgrund ihrer begrenzten Wiederaufbereitungsmöglichkeiten einem kaskadierenden Qualitätsverlust und verlassen den Kreislauf mittelfristig, was sich negativ auf die dauerhafte Zirkularität auswirkt. Insgesamt steigt der Anteil der Konstruktionsteile, die nach der stoffstrombasierten Bewertung nicht oder nur begrenzt zirkulär rück-

führbar sind, wieder auf etwa 43,36 %.

Die Ursachen für diese Diskrepanzen lassen sich auf der Bauteilebene differenziert nachvollziehen. In der Pre-Use-Analyse zeigt sich, dass die größten Lücken weiterhin in den Bereichen der Fenster und der Bodenplatte bestehen. Beide Bauteile bringen entweder aufgrund geringer Wiederverwendungsanteile oder durch den Einsatz konventioneller Materialien (z. B. neuer Dämmstoffe, konventioneller Estriche) keinen wesentlichen Beitrag zum CPX. Auch bei den Decken liegt der Rezyklatanteil in den eingesetzten Schichten aktuell noch unterhalb relevanter Schwellenwerte, was die Gesamtbewertung auf unter 80 % drückt.

In der Post-Use-Betrachtung fällt auf, dass besonders die großen Massenfraktionen, so wie Gründung, Decken und tragende Wände, nur sehr geringe stoffliche Rückführbarkeit aufweisen. Ihre Rezyklierbarkeit überschreitet zumeist nicht die 5 %-Marke. Eine Ausnahme bildet hier das Gründach, das durch seinen mineralischen Aufbau mit kompostierbaren Bestandteilen (z. B. Substratschicht) positiv hervortritt. Hier konnte im Bereich der Rezyklierbarkeit ein Wert von rund 20 % verbucht werden.

Die Trennbarkeit bleibt insgesamt eine Herausforderung. Viele Bauteile bestehen aus Mehrschichtsystemen, die nur durch aufwendige mechanische Verfahren sortenrein getrennt werden können. Dies betrifft etwa Gipsplatten, Dämmstoffe oder Betonverbunde. Sowohl bei der Trennbarkeit als auch bei der Wiederverwertung wird zudem deutlich, dass ein Großteil der zirkulären Potenziale auf professionellen Herstellungs- oder Rückbauprozessen basiert. Viele Materialien lassen sich nicht ohne werkseitige Vorbehandlung trennen oder wiederverwerten, was dazu führt, dass sowohl Trennbarkeit mit 70 % Bewertungsanteil als auch Wiederverwertung mit 75 % ähnliche systemische Einschränkungen aufweisen. Die enge Verschränkung dieser beiden Kategorien wird dadurch besonders deutlich.

Einzelne bauteilspezifische Verbesserungen in der De-

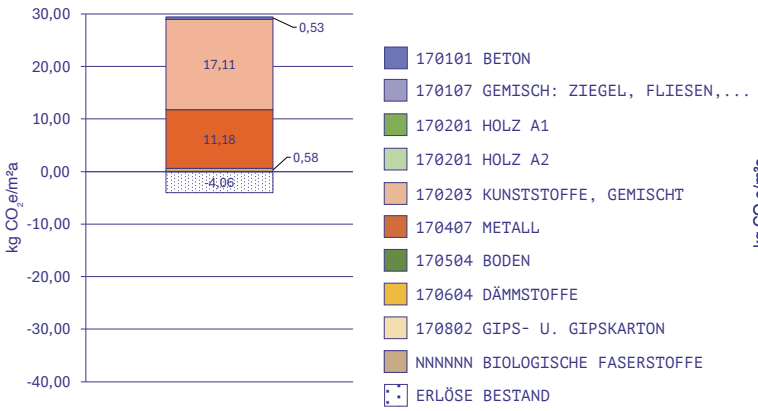
montierbarkeit lassen sich insbesondere bei der Gründung wie z. B. Fliesen mit loser Mörtelbettung sowie beim Gründach nachweisen. Letzteres bringt durch seine lose Schüttung von Granulaten und Substraten nicht nur positive Beiträge zur Rückführung mit sich, sondern kann auch ohne maschinelle Zerkleinerung rückgebaut werden. Diese Eigenschaften führen dazu, dass bei entsprechender Planung Demontierbarkeit punktuell deutlich verbessert werden kann. Weitere Informationen zu der Bauteilebene sind im Anhang zu finden.

Zusammenfassend zeigt sich in Variante 1 eine deutliche Steigerung der Zirkularität gegenüber der Ausgangssituation. Besonders im Pre-Use-Bereich wurden durch gezielte Wiederverwendung erhebliche Fortschritte erzielt. Die Post-Use-Potenziale profitieren zwar von einer verbesserten Stoffstromqualität, stoßen jedoch an Grenzen, die vor allem durch die Art der eingesetzten Materialien sowie deren Verbundbauweise bedingt sind. Für weiterführende Entwurfsstrategien ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Materialien nicht nur nach ihrem Vorleben (Reuse-Potenzial), sondern auch nach ihrer Rückführbarkeit und Aufbereitungstechnologie auszuwählen und zu planen.

Treibhausgase

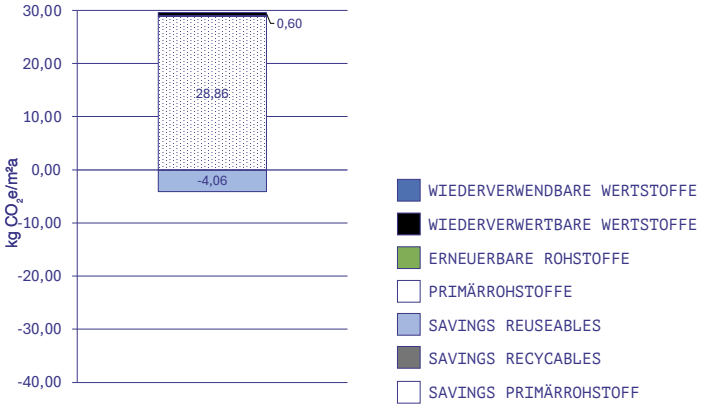
In der Variante 1 ergibt sich für das gesamte Gebäude ein Treibhausgasemissionswert von 29,61 $kgCO_2e/m^2a$. Im Vergleich zur Ausgangsvariante (Variante 0: 31,03 $kgCO_2e/m^2a$) stellt dies eine Reduktion von etwa 1,42 $kgCO_2e/m^2a$ dar. Diese Einsparung ist insbesondere auf zwei zentrale Faktoren zurückzuführen: Zum einen kommt es trotz einer erhöhten Gesamtbaumasse, diese von 20.521,59 t in Variante 0 auf 22.736,04 t in Variante 1 ansteigt, zu einem wirklich deutlich angestiegenden Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen (Reusables), die in der Treibhausgasbilanz nicht mit Herstellungsemissionen belegt werden. Zum anderen wurde bewusst auf emissionsärmere Materialien wie mineralische Dämmstoffe mit Rezyklatanteil oder alternativen Fassadenaufbau gesetzt.

Ein konkreter Einspareffekt zeigt sich insbesondere im



GESAMT: 29,61 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -4,06 kgCO₂e/m²a

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN



GESAMT: 29,61 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -4,07 kgCO₂e/m²a

GWP NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	GWP total (kg CO_2e)/m2	GWP total (kg CO_2e)/m2*a
170101 Beton	26,52	0,530464959
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0
170201 Holz A1	0,00	0
170201 Holz A2	0,59	0,011741856
170203 Kunststoffe, gemischt	0,41	0,008161895
170407 Metall	559,11	11,18225461
170604 Dämmstoffe	29,22	0,584457579
170802 Gips- u. Gipskarton	0,26	0,005133837
170904 Baumischabfall	1,59	0,031818193
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,00	0
170202 Glas	855,50	17,11009208
170504 Boden	7,17	0,143381793
Erlöse Bestand	-202,75	-4,05505604
Gesamt		25,55

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,60
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,16
Primärrohstoff	28,86
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-0,01
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

GWP NACH STOFFSTROM

Tab. 20: GWP-Bilanz

Bereich der Betonverwendung: Während in Variante 0 der Beton, insbesondere im Fassadenbereich, einen deutlich höheren Anteil an der GWP-Bilanz hatte, reduziert sich dieser Anteil in Variante 1 auf lediglich 0,53 kgCO_2e/m²a, dies entspricht etwa der Hälfte des ursprünglichen Wertes. Diese Einsparung ist darauf zurückzuführen, dass nun kein zusätzlicher Fassadenbeton zur Anwendung kommt, sondern auf wiederverwendete Metallverkleidungen aus industriellem Rückbau zurückgegriffen wurde.

Im Bereich der Fenster bleibt der Treibhausgasanstoß unverändert, da der Fensterflächenanteil zwischen bei-

den Varianten konstant gehalten wurde und weiterhin neue Fensterelemente mit vergleichbaren Materialkennwerten zum Einsatz kommen. Hingegen zeigen sich Einsparungen bei den Dämmstoffen: Durch den Einsatz von Mineralwolle mit einem dokumentierten Rezyklatanteil konnten die Emissionen in diesem Bauteilbereich um etwa 0,35 $kgCO_2e/m^2a$ auf 0,58 $kgCO_2e/m^2a$ gesenkt werden. Der Dachaufbau hingegen bringt in Variante 1 durch die Integration eines Gründaches einen leicht erhöhten GWP-Anteil mit sich. Das Substrat und die pflanzliche Schicht verursachen zwar keine hohen Emissionen, aber in Summe ist der GWP-Wert mit 0,14 $kgCO_2e/m^2a$ etwas höher als bei der zuvor eingesetzten Bitumenabdichtung.

Die Analyse im Rahmen der stoffstrombasierten Bewertung bestätigt die zentralen Erkenntnisse der CPX-Analyse: Die Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen bleiben die eingesetzten Primärmaterialien. Zwar steigt die Masse an Reusables deutlich an, was grundsätzlich positive Auswirkungen auf die Ökobilanz hat, denn die Gutschrift liegt in Variante 1 bei 4,07 $kgCO_2e/m^2a$, jedoch entfalten diese Einsparungen nicht die erwartete Wirkung, da einzelne Materialien mit hohem CO_2-Fußabdruck wie Aluminium oder Glas diese Effekte teilweise überkompensieren. Insbesondere Glas weist im Lebenszyklus trotz hoher Rezyklierbarkeit hohe Emissionen auf, da Rückbau, Transport und Wiedereinschmelzung energieintensiv sind.

Somit bleibt der Beitrag der Reusables in Bezug auf die Masse zwar erheblich, ihr relativer Anteil an der Treibhausgasbilanz wird jedoch durch den Materialtyp (insbesondere Aluminium und Glas) abgeschwächt. Sekundärrohstoffe tragen hingegen bislang nur marginal zur Reduktion bei, da sie mengenmäßig noch zu gering vertreten sind. Eine zukünftige Optimierung könnte also nicht nur auf die Erhöhung der ReUse-Materialien zielen, sondern gezielt auch emissionsarme Sekundärrohstoffe mit höherem Rezyklatanteil integrieren, um die positiven Wirkungen der zirkulären Planung konsequenter auch in der GWP-Bilanz zur Geltung zu bringen.

Wirtschaftlichkeit

In der Kostenbetrachtung der Variante 1 zeigt sich ein ähnliches Gesamtbild wie bereits in Variante 0: Es dominieren deutlich negative Verwertungskosten, die sich in dieser Variante auf insgesamt 51,74 €/m² summieren. Dieser hohe Wert ist maßgeblich auf die gesteigerte Masse an verbauten Materialien sowie die spezifische Materialwahl zurückzuführen, wobei vor allem Dämmstoffe und Kunststoffkomponenten eine zentrale Rolle einnehmen. Demgegenüber stehen lediglich moderate Erlöse in Höhe von 1,93 €/m², die sich hauptsächlich aus der Verwertung der eingesetzten Metalle ergeben.

Die detaillierte Analyse der Kostenstruktur offenbart, dass insbesondere die Dämmstoffe ein erheblicher Kostentreiber sind. Mit einem Wert von 14,87 €/m² liegen die Entsorgungskosten hier deutlich über dem Niveau der Ausgangsvariante, was primär auf die erhöhte Dämmmasse zurückzuführen ist. Diese ergibt sich u. a. aus dem Umstand, dass nun auch der ehemals ungenutzte Technikbereich im Untergeschoss aktiviert und entsprechend gedämmt wurde. Ergänzt wird dieser Effekt durch die Tatsache, dass in Variante 1 keine ReUse-Dämmstoffe zur Verfügung standen und folglich auf mineralische Dämmstoffe mit Rezyklatanteil zurückgegriffen wurde, deren Entsorgungskosten dennoch relevant bleiben.

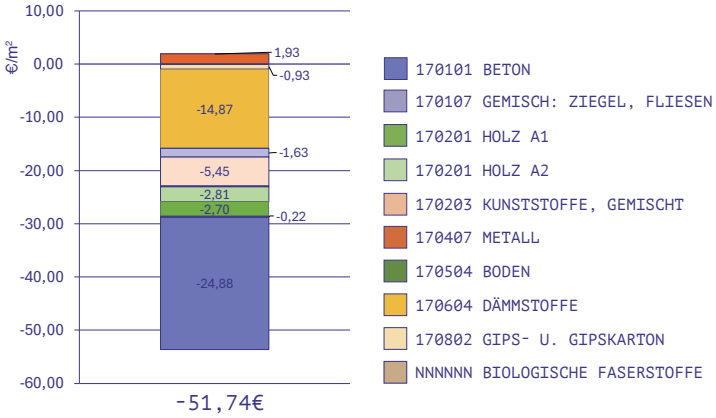
Ein weiterer signifikanter Kostentreiber ist im Bereich der Kunststoffe zu verorten. Aufgrund der vorgehängten, hinterlüfteten Fassade wurde eine schützende Folie auf der Dämmung installiert, welche in der Massebilanz sowie in den Entsorgungsprozessen nun stark ins Gewicht fällt. Diese Folie wird in der Stoffstromanalyse den Kunststoffen zugeordnet und verursacht bei einem Verwertungspreis von 219 €/t Kosten in Höhe von 5,45 €/m² und ist somit eine Entwicklung, die sich in Variante 0 in dieser Ausprägung noch nicht beobachten ließ.

Die Analyse im Rahmen der stoffstrombasierten Bewertung bestätigt diese Entwicklung. Zwar nimmt der Anteil an ReUse-Bauteilen gegenüber Variante 0 signifikant zu, was grundsätzlich als positiv für die zirkuläre Qualität des

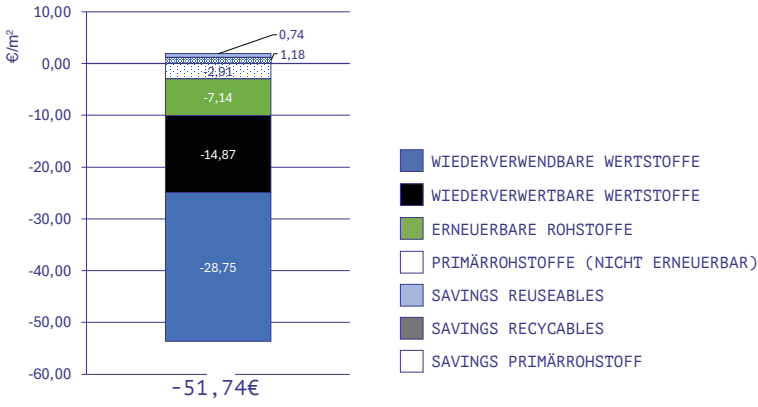
Tab. 21:
Kosten-Bilanz

Bauteil	Baukosten (€/gesamt)	Rückbau (€)	Entsorgung (€)	Rückbau- und Entsorgungskosten Rückbau nach 50 Jahren (€/gesamt)	Gesamt (€/gesamt)
Außenwand	628.430,89 €	512.444,96 €	108.845,50 €	621.290,46 €	1.249.721,35 €
Bodenplatte	930.214,53 €	1.454.807,30 €	439.282,68 €	1.894.089,99 €	2.824.304,52 €
Decken	1.254.564,52 €	2.795.751,70 €	245.074,75 €	3.040.826,45 €	4.295.390,96 €
Dach	1.564.257,33 €	938.935,74 €	125.905,27 €	1.064.841,01 €	2.629.098,34 €

GESAMTKOSTEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
170101 Beton	-24,88
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	-0,22
170201 Holz A1	-2,70
170201 Holz A2	-2,81
170203 Kunststoffe, gemischt	-5,45
170407 Metall	1,93
170604 Dämmstoffe	-14,87
170802 Gips- u. Gipskarton	-0,93
170904 Baumischabfall	-0,04
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,00
170202 Glas	-0,14
170504 Boden	-1,63
170302 Bitumengemische	0,00
Gesamt	-51,74

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	-28,7516114
wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	-14,8677902
Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	-7,14035138
Primärrohstoff	-2,91
Savings Reusables	0,74
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,01
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Savings Primärrohstoff	1,18

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

Gebäudes zu werten ist, doch wirkt sich diese Massenzunahme gleichzeitig negativ auf die Kosten aus. Denn trotz ihres ökologischen Vorteils verursachen viele ReUse-Komponenten, so insbesondere aus Beton. hohe Verwertungskosten. Beton als schweres Material bleibt in seiner Masse dominant und erzeugt durch die aufwendige Behandlung im Rückbau sowie seine begrenzte stoffliche Wiederverwertbarkeit einen Großteil der negativen Kostensalden. Vereinzelte ReUse-Komponenten, wie etwa die zurückgeführte Metallfassade, erzielen zwar potenziell positive Effekte, die im Rahmen dieser Arbeit mit „Savings“ bezeichnet werden, doch ist deren Masseanteil zu gering, um nennenswerte wirtschaftliche Entlastung zu schaffen.

Die nennenswerten Erlöse entstehen primär durch die Verwertung hochwertiger Primärrohstoffe, insbesondere des Aluminiums in den Fenstern. Auch die ReUse-Metallfassade trägt dazu bei, wobei die Erlöse in der Gesamtsumme jedoch nicht ausreichen, um den negativen Saldo auszugleichen. Dieses Missverhältnis verweist auf einen grundlegenden Zielkonflikt innerhalb zirkulärer Planung: Die ökologische Aufwertung durch Wiederverwendung führt nicht automatisch zu wirtschaftlichen Vorteilen, sofern keine skalierbaren Rücknahmesysteme oder Subventionierungen bestehen.

Insgesamt verdeutlicht die Kostenbilanz der Variante 1, dass eine Erhöhung des ReUse-Anteils und der Einsatz emissionsärmerer Materialien zwar die Umweltwirkungen reduzieren können, jedoch nicht automatisch zu geringeren Lebenszykluskosten führen. Vielmehr bedarf es einer noch gezielteren Materialwahl unter Berücksichtigung von Masse, Rückbaupotenzial und realistischen Verwertungsszenarien, um zirkuläre Bauweisen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten attraktiv und tragfähig zu gestalten.

Insgesamt belaufen sich die Gesamtkosten auf 10.998.515,17 €.

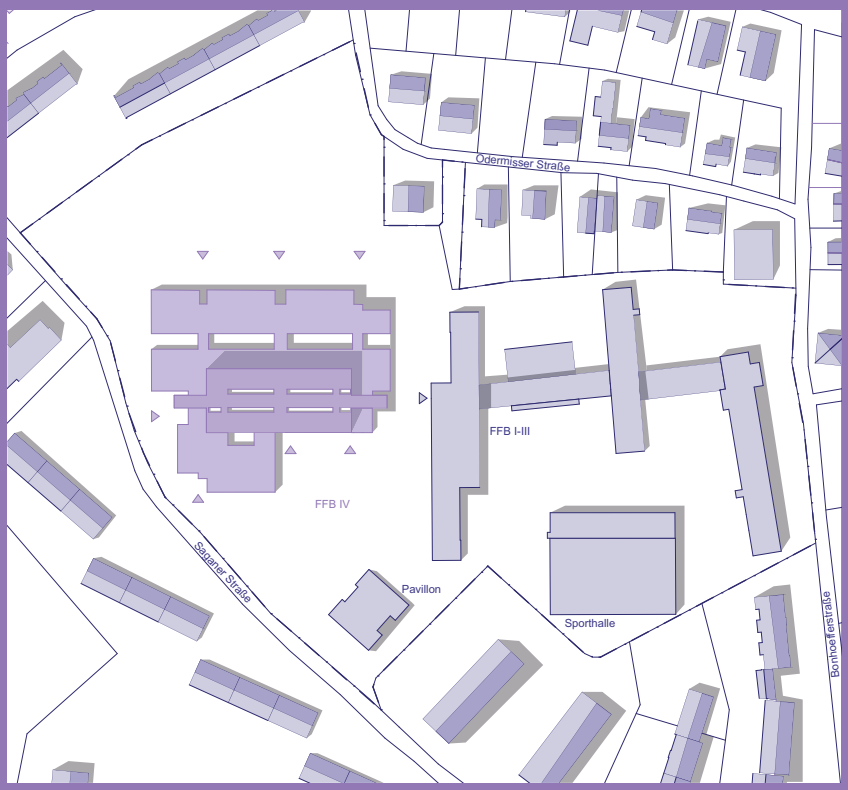


Abb. 115:
Perspektive
auf den
Eingangsbereich

5.3.1 Variante 2: Lightning Up

Architektur

In Variante 2 steht die Idee der Subtraktion und räumlichen Öffnung im Zentrum des architektonischen Konzepts. Die architektonische Geste der Einschnitte wird dabei nicht nur als visuelle Maßnahme verstanden, sondern strategisch im Sinne der Funktionalität und der Tageslichtführung eingesetzt. Die Einschnitte folgen bewusst dem konstruktiven Raster des Bestandsgebäudes, um eine strukturell logische Eingliederung in die Tragstruktur zu gewährleisten. Dabei wurde präzise darauf geachtet, dass sich trotz der subtraktiven Eingriffe weiterhin sinnvolle und nutzbare Grundrisse für die Lehrnutzung entwickeln lassen. Die neuen Öffnungen korrespondieren gezielt mit den Bereichen, an denen sich die Tragstruktur am effektivsten unterbrechen lässt: Die innerliegenden Stützen bleiben erhalten und geschützt, während ausgewählte Trägerabschnitte behutsam entfernt werden können. Im Dachbereich wird durch die Demontage der Trapezblechstruktur eine einfache Öffnung



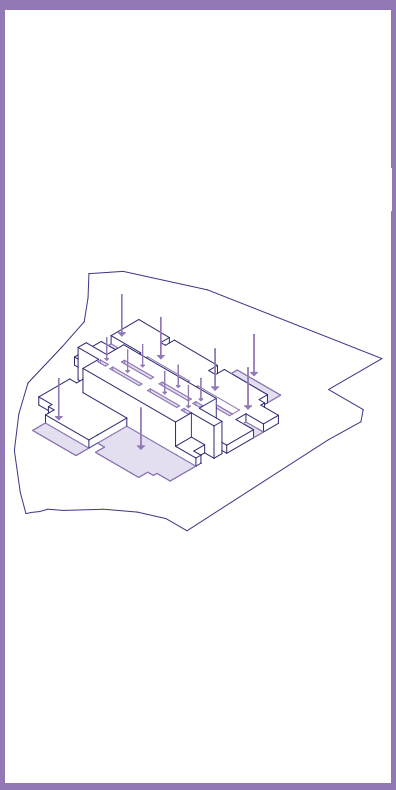


Abb. 116: Lageplan zur Variante 2, maßstabslos

Abb. 117: Piktogramm Varianten Schwerpunkt

nach oben ermöglicht, ohne Eingriffe in statisch tragende Elemente.

Diese architektonischen Eingriffe führen dazu, dass insbesondere im Bereich der Klassenräume eine funktionale und räumliche Neuinterpretation entsteht: An den Stellen, an denen Einschnitte erfolgen, wird bewusst ein räumliches Ensemble aus Klassenraum, vorbereitender Fläche und Übungsbereich gebildet. Dadurch entsteht ein kontinuierlicher Austausch sowohl innerhalb der Lernräume als auch mit dem Außenraum. Die Sichtbezüge zwischen den einzelnen Funktionsbereichen sowie zwischen Nutzergruppen fördern nicht nur die Transparenz, sondern unterstützen auch die soziale Interaktion und Gemeinschaftsbildung innerhalb der Schule. Ebenso profitiert die Lehrerschaft: Für sie werden Arbeitsbereiche geschaffen, die in direkter Verbindung zu gemeinschaftlichen Orten stehen und einen erhöhten Außenraumbezug aufweisen. Dies trägt zu einer gesteigerten Aufenthaltsqualität und Funktionalität des Lehrbereichs bei.

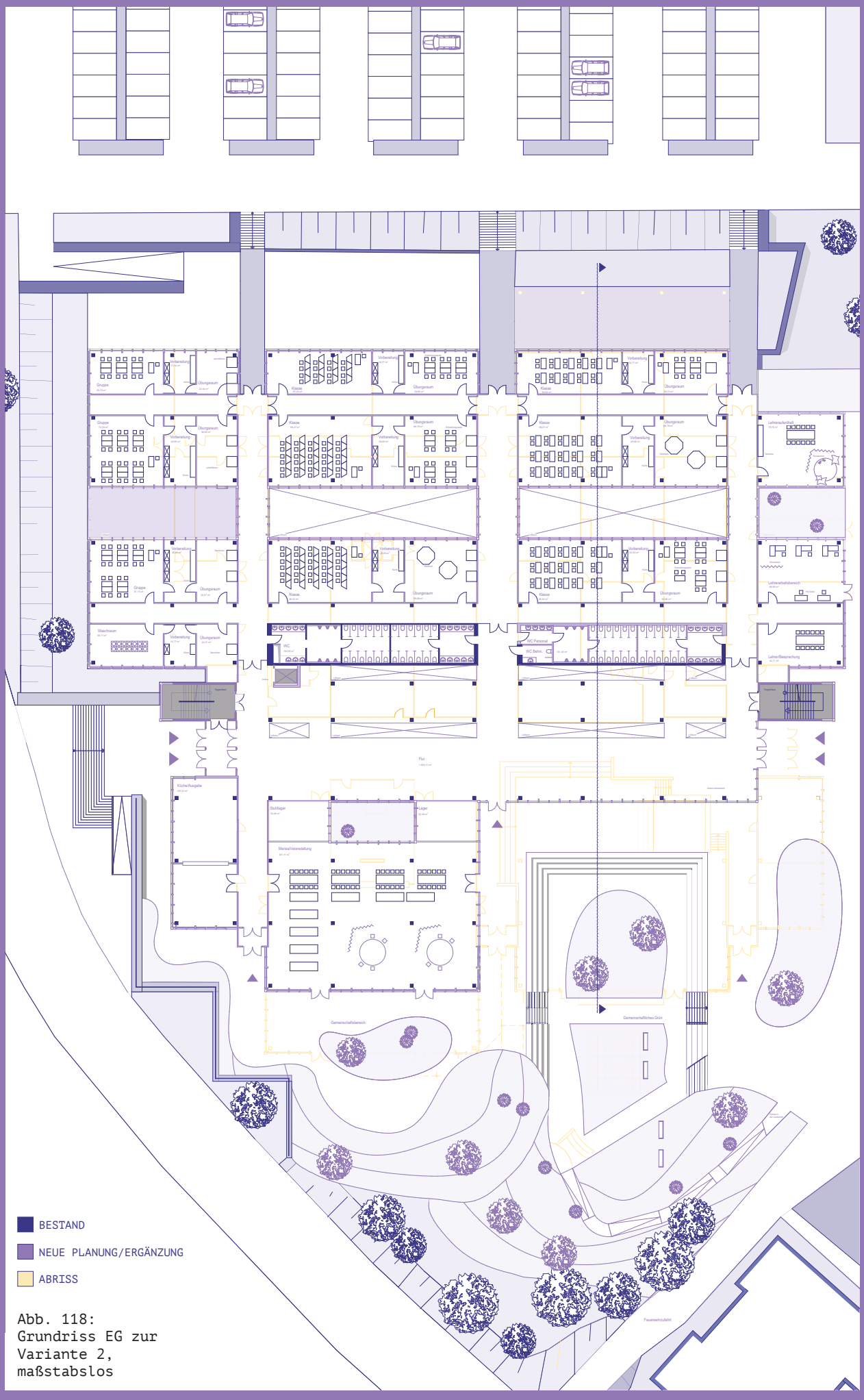


Abb. 118:
Grundriss EG zur Variante 2, maßstabslos

FLÄCHENVERTEILUNG IN M²

	EG	UG	OG
KLASSEN	687	610	299
ÜBUNGSRAUM	447	403	66
VORBEREITUNG/LAGER	189	108	99
LEHRER	260	70	99
ERSCHLIESSUNG	1654	662	340
GEMEINSCHAFT	401	0	32
SONSTIGES	329	158	35
GESAMT	**3967**	**2011**	**664**

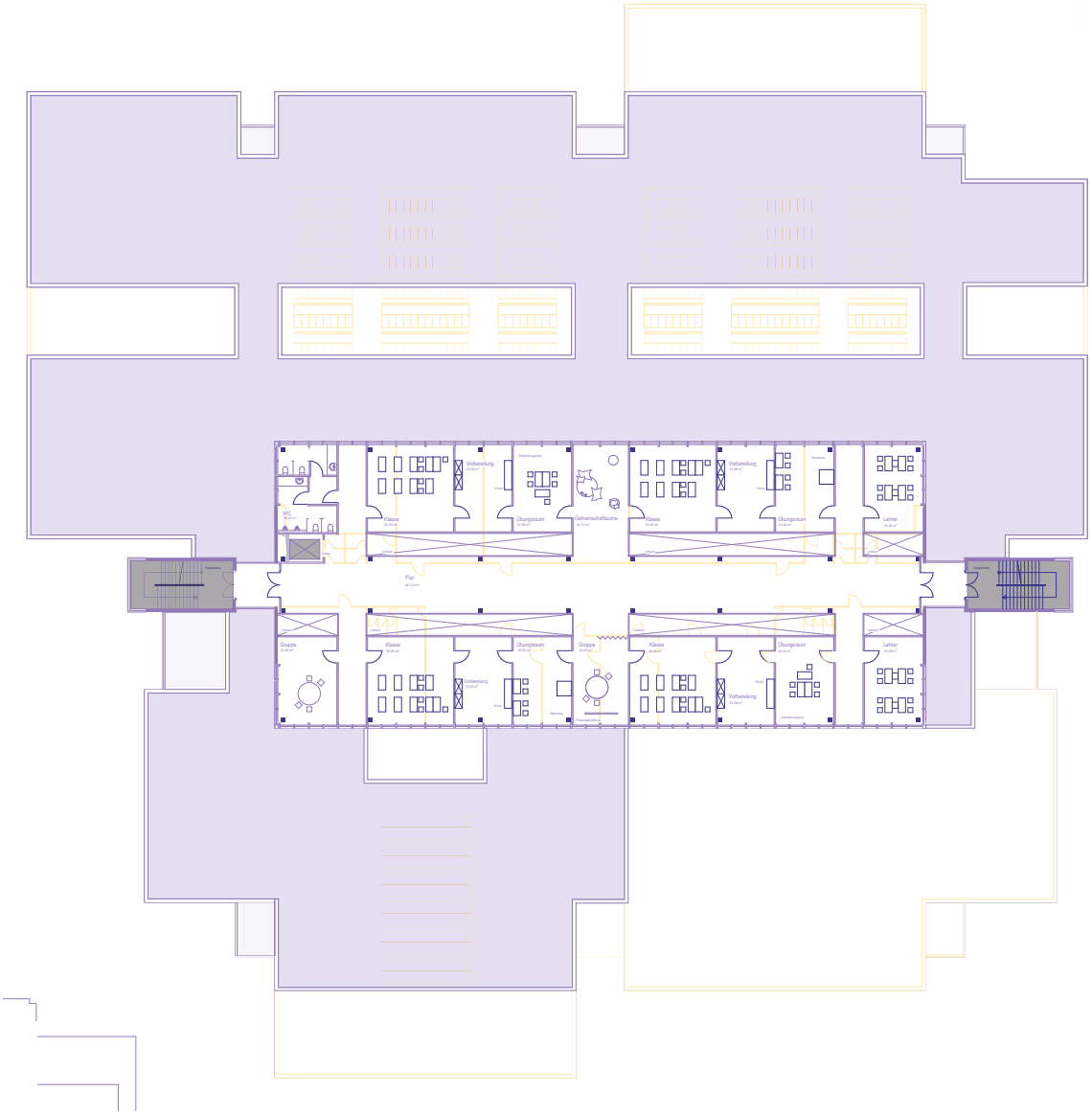


Abb. 119:
Grundriss OG zur Variante 2, maßstabslos

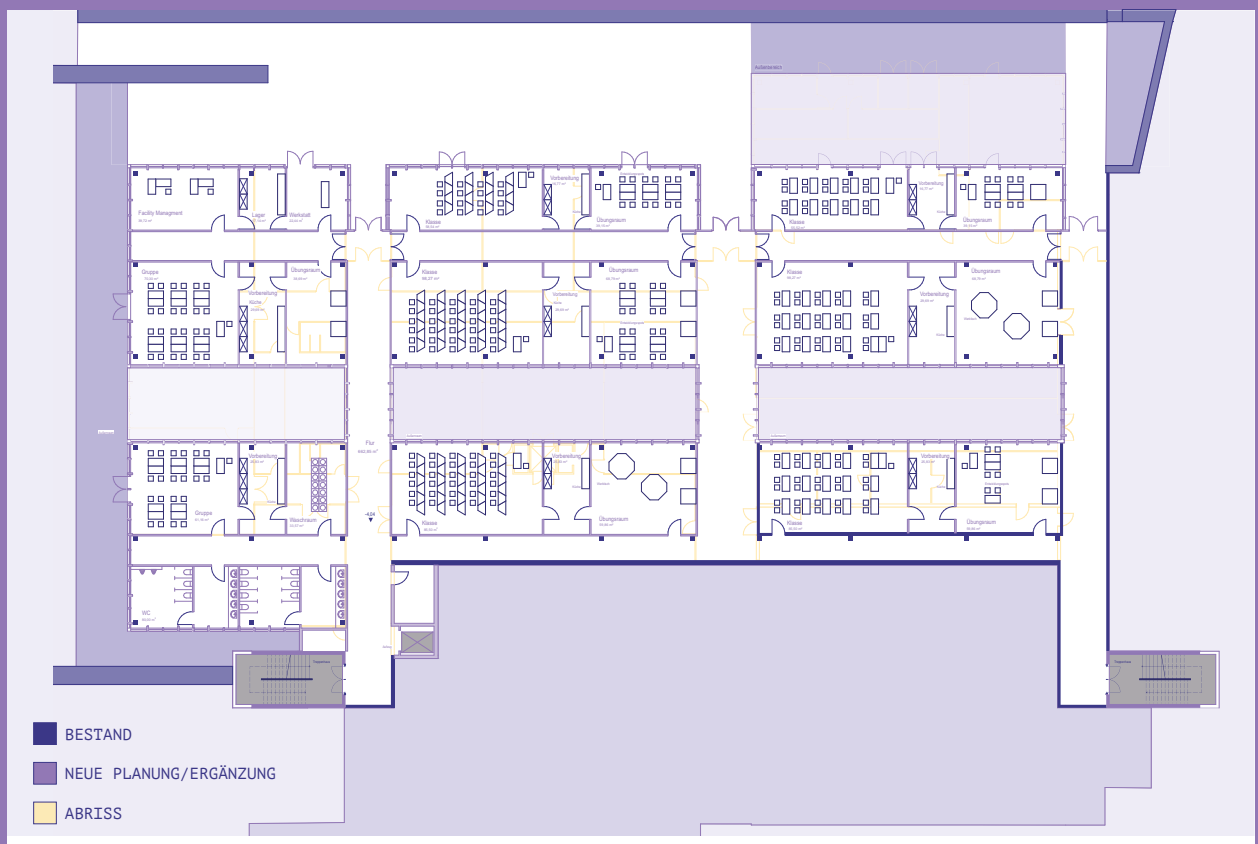


Abb. 120:
Grundriss OG zur
Variante 2,
maßstabslos

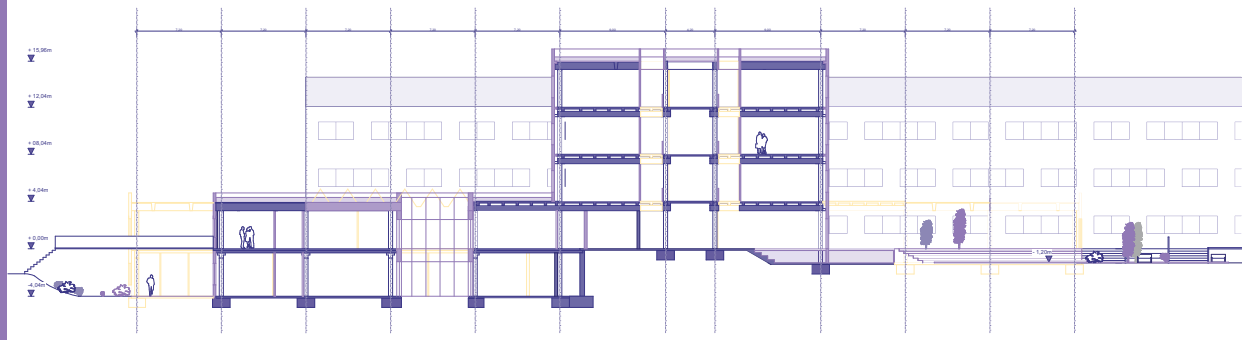


Abb. 121:
Schnitt,
maßstabslos

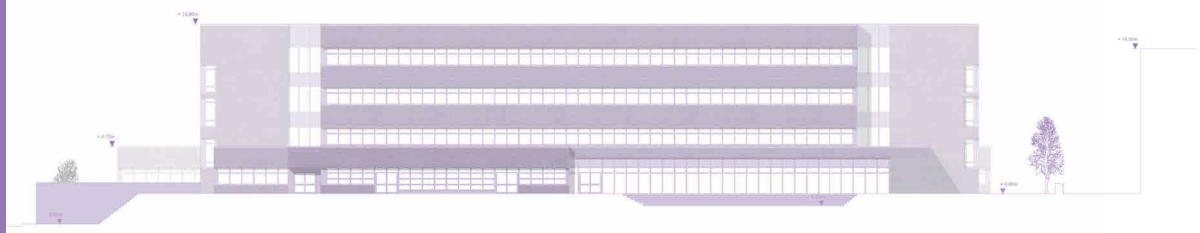


Abb. 122:
Ansicht Süd,
maßstabslos

Im Erdgeschoss setzt sich die klare funktionale Zonierung fort. Die Trennung zwischen öffentlichen Gemeinschaftsflächen und schulisch genutzten Lernbereichen wird architektonisch explizit herausgearbeitet. Besonders deutlich wird dies in der Umgestaltung der Mensa und des Forums: Während die Mensa durch gezielte Subtraktion neue Außenräume öffnet und damit eine höhere Aufenthaltsqualität im Freien erzeugt, wird das Forum in seiner bisherigen Form vollständig rückgebaut. Durch diese Maßnahme wird der Außenbereich aktiviert, denn die ehemals eingeschlossene Fläche wird entsiegelt und zu einem gestalteten Grünraum umgewandelt. Die naturräumliche Qualität dieses neuen Außenraums erfährt eine deutliche Aufwertung, da die Gestaltung sich organisch an den Grünzug der angrenzenden FFB-Gebäudeteile I–III anschließt. Es entsteht ein homogener Außenraumverbund mit hoher Nutzungsqualität, welcher durch gezielte Pflanzung von Bäumen auch verschattete Aufenthaltsbereiche ermöglicht. Der Übergang zwischen Sitzgelegenheiten und naturnahen Bereichen wird dabei flexibel und gestalterisch differenziert umgesetzt, sodass unterschiedliche Nutzungspräferenzen räumlich abgebildet werden können.

Im Bereich des ehemaligen Forums wird zusätzlich die ursprüngliche innenliegende Treppenanlage nun in den Außenraum integriert. Die Treppen dienen dort künftig nicht nur als funktionales Erschließungselement, sondern zugleich als Plattform für Austausch, Begegnung und Präsentation. In Kombination mit den im Grünraum verteilten Liegeflächen entsteht ein atmosphärischer, kommunikativer Ort, der sowohl informelle Bildungsprozesse als auch soziale Interaktion unterstützt. Zudem wird durch diese neue Gestaltung das Ankommen im Gebäude aufgewertet: Die Erschließung erhält eine klare architektonische Adressbildung, wodurch sich das Gebäude in seiner Eigenständigkeit und Nutzungsidentität deutlich gegenüber den übrigen Gebäudeteilen absetzt. Die Lernstraße, ein zentrales konzeptuelles Element der angrenzenden FFB-Abschnitte, bleibt erhalten und wird in Variante 2 durch eine repräsentative Eingangsfassade ergänzt.

Die beschriebene architektonische Strategie setzt sich auch im Untergeschoss konsequent fort. Hier sorgen gezielte Einschnitte für eine signifikante Verbesserung der Belichtungsqualität und bis in die Tiefe des Gebäudes hinein kann nun eine Nutzung mit Tageslicht realisiert werden. Zusätzlich wird im rechten Gebäudeflügel eine Achsenreihe subtrahiert, wodurch ein weiterer großzügiger Außenraum erschlossen wird. Die Aufenthaltsqualität steigt dadurch erheblich, denn nicht nur wird das UG mit Tageslicht versorgt, auch die Verbindung zu den Grünflächen und die Nutzbarkeit des Außenraums wird maßgeblich verbessert.

In den Obergeschossen zeigt sich das Konzept der räumlichen Durchlässigkeit ebenfalls. Über Öffnungen in den Decken entsteht ein direkter Austausch zwischen den Geschossen, welcher sowohl visuell als auch akustisch wahrnehmbar ist. Lernbereiche erhalten so eine spezifische räumliche Zonierung, bei der durch verglaste Übergänge eine modulierte Verbindung zwischen Klassenräumen, Gemeinschaftsflächen und Erschließungszonen realisiert wird. Die Einschnitte wirken dabei als räumlicher Puffer und ermöglichen einen gleitenden Übergang zwischen privater Konzentration und gemeinschaftlichem Austausch. Diese räumlich-strukturelle Differenzierung erzeugt vielfältige Aneignungsmöglichkeiten und unterstützt differenzierte Lernszenarien im pädagogischen Alltag.

Auch in Variante 2 wurde großer Wert auf Barrierefreiheit gelegt. Sowohl im Innen- als auch im Außenbereich wurde durch die Ergänzung eines Fahrstuhls sowie durch den Einbau von Rampenanlagen gewährleistet, dass alle Nutzungsbereiche uneingeschränkt zugänglich sind.

Konstruktion

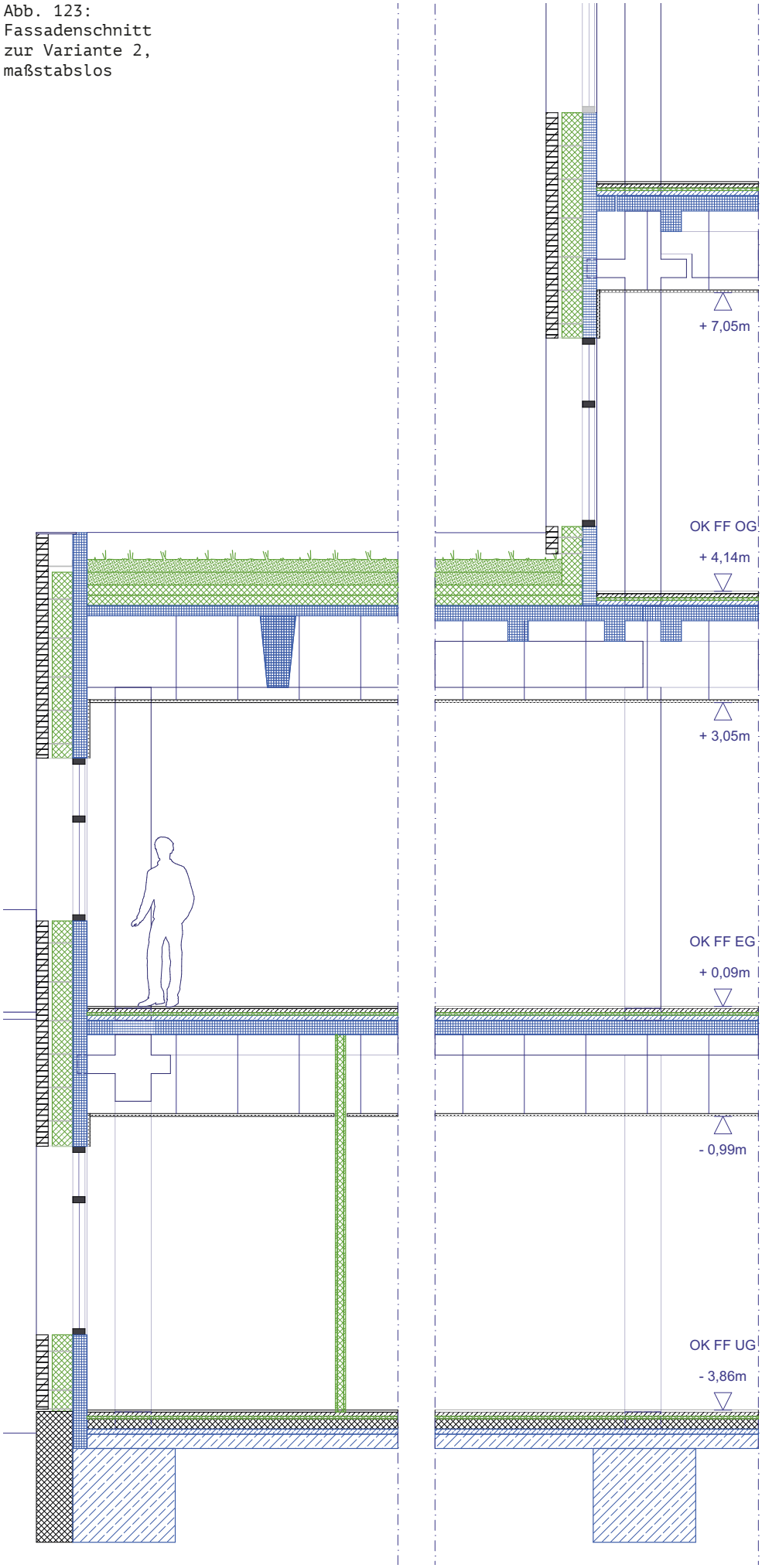
Die konstruktive Ausgestaltung der Variante 2 ist maßgeblich durch das Ziel geprägt, den Anteil an recycelten und recyclingfähigen Materialien in den verschiedenen Bauteilschichten systematisch zu erhöhen. Im Zentrum der bautechnischen Strategie steht die konsequente In-

tegration von Stoffen mit hoher Kreislaufpotenz, was sowohl durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen als auch durch die gezielte Auswahl nachwachsender oder post-use-recyclingfähiger Materialien erzeugt wird. Diese Entscheidung wird auf der Ebene der Fassade, der inneren Raumabschlüsse, der Gründung sowie der Deckenkonstruktionen durchgängig angewendet.

Im Bereich der Außenwandkonstruktion kommen sogenannte RecyclingBricks zum Einsatz, womit es sich um ein Produkt der deutschen Firma Deppe handelt, das aus 70 % recyceltem Ziegelschutt und 30 % lokalem Ton besteht. Diese Ziegel entstammen regionalen Abbruchgebäuden und werden ohne Qualitätsverlust zu neuen, vollwertigen Mauersteinen verarbeitet. Neben der Reduktion von CO_2-Emissionen in der Herstellung bietet dieses Produkt den Vorteil einer vollständigen stofflichen Rückführbarkeit nach der Nutzung. Die Ziegel werden in einer losen, also nicht verklebten Verbindung verbaut, um die sortenreine Demontage und Wiederverwertung zu ermöglichen.

Daran anschließend wird ein diffusionsoffenes Windpapier mit Recyclinganteil als Witterungsschutz integriert. Moderne Varianten dieses Materials bestehen häufig aus recyceltem Kunststoff, etwa aus alten PET-Flaschen. Trotz ihrer Sekundärrohstoffbasis erfüllen sie sämtliche bautechnischen Anforderungen an Langlebigkeit und Funktionalität im Fassadenbau. Die folgende Dämmschicht besteht aus Hanf, einem nachwachsenden Rohstoff mit besonders positiver Ökobilanz. Auch wenn in der Herstellung in der Regel auf frische Fasern zurückgegriffen wird, überzeugt Hanf durch seine vollständige Rückbaubarkeit, Kompostierbarkeit und im Bedarfsfall auch durch mechanische Wiederverwendbarkeit. Die abschließende Schicht an ausgewählten Stellen der Innenwandflächen bilden Reapor-Platten, welche aus nahezu 100 % geschäumtem Altglas bestehen. Diese akustisch wirksamen Ausbauplatten kommen ohne zusätzliche Bindemittel aus, erfüllen hohe Brandschutzanforderungen und lassen sich vollständig recyceln. Ihre Anwendung macht insbesondere in Hinblick auf die Wiederverwertung von

Abb. 123:
Fassadenschnitt
zur Variante 2,
maßstabslos



AUSSENWAND
U= 0,19 W/M²K

ALUMINIUM	3
UPE 160 TRÄGER	
PE FOLIE	<1
MINERALWOLLE	200
STAHLBETON	140

DACH
U= 0,19 W/M²K

GRANULAT GRÜNDACH	3
PE-FOLIE	<1
MINERALWOLLE	200
TRAPEZBLECH	150
ABHÄNGESYSTEM GIPS	5

DECKEN

FLIESE	15
KORKUNTERLAGE	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL MINERAL	60
ESTRICH	40
STAHLBETON	100
ABHÄNGESYSTEM ALU	5

INNENWAND

HOLZ	22
MINERALWOLLE	100

BODEN
U= 0,14 W/M²K

FLIESE	15
KORKUNTERLAGE	3
ESTRICH	80
PE FOLIE	<1
TRITTSCHALL MINERAL	60
MINERALWOLLE	200
ESTRICH	40
GRÜNDUNG STB	200

Fensterglas Sinn, das andernfalls nur mit etwa 10 % Anteil in neuen Fenstern einsetzbar ist.

Im Innenausbau werden bei den Trennwänden Hanfwolle und Lehmbauplatten kombiniert. Die Lehmbauplatten bestehen aus natürlichen Materialien wie Lehm, Sand, Ton, Hanf- oder Strohfasern. Sie benötigen keine energieintensive Brennung und sind aufgrund ihrer Zusammensetzung vollständig abbaubar, recycelbar oder wiederverwendbar. Diese Materialwahl unterstützt nicht nur ein gesundes Raumklima, sondern gewährleistet auch eine vollständig rückführbare Nutzung innerhalb geschlossener Stoffkreisläufe.

Im Bereich der Gründung kommen Shard-Fliesen als ergänzende Bauteilschicht zum Einsatz. Diese bestehen vollständig aus recyceltem Bauschutt wie z. B. alte Fliesen, Ziegel, Keramik oder Beton und lassen sich ohne Zusatz von Primärrohstoffen zu neuen keramischen Elementen verarbeiten. Durch ihre lose Verlegung auf einer Korkschicht, das nach dem Prinzip des Systems „DryTiles“ gedacht und als theoretisches System im Rahmen dieser Arbeit angenommen wird, ist eine sortenreine Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit sichergestellt. Neben den ökologischen Vorteilen bieten diese Fliesen auch eine haptisch und visuell anspruchsvolle Oberfläche. Die Wahl dieses Systems zeigt beispielhaft, wie sich technische Funktionalität und Designanspruch in einer konsequent zirkulären Bauweise vereinen lassen.

Als zusätzliche Aufbauschicht wird Trockenestrich mit Recyclinganteil verwendet. Diese bestehen aus Gipsfaserplatten oder zementgebundenen Holzwerkstoffen, die zu 60–90 % aus rückgebauten Baustoffen bestehen können. Trockenestrichsysteme erfordern keine Trocknungszeit, lassen sich emissionsarm verarbeiten und sind bei sortenreiner Verlegung vollständig demontierbar. Für Gipsfaserprodukte bestehen bereits etablierte Rücknahmesysteme, wodurch diese Bauweise ein besonders hohes Rückbaupotenzial bietet.

Für die Deckenkonstruktion, insbesondere die abge-

hängten Decken, wird Aluminium verwendet und bevorzugt in Form von Sekundäraluminium. Dieser Werkstoff überzeugt durch seine nahezu verlustfreie Recyclingfähigkeit: Er kann unbegrenzt wiederverwertet werden, ohne an Materialqualität zu verlieren. Aluminium erfordert im Recyclingprozess nur einen Bruchteil der Energie im Vergleich zur Primärproduktion, wodurch es sich ideal für den Einsatz in nachhaltigen Gebäudesystemen eignet. Insbesondere in modularen Deckensystemen unterstützt Aluminium sowohl die flexible Nutzung als auch die vollständige Rückführung in den Materialkreislauf. In Variante 2 trägt dieser Konstruktionsbaustein damit wesentlich zur zirkulären Gesamtperformance bei.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in Variante 2 durch die gezielte Auswahl von Produkten mit hohen Recyclinganteilen und kreislauffähigen Eigenschaften ein signifikanter Fortschritt im Sinne des zirkulären Bauens realisiert wird. Die Kombination aus recycelten, nachwachsenden und sortenrein rückbaubaren Materialien etabliert nicht nur ein robustes ökologisches Fundament, sondern ermöglicht auch eine anwendungsnahe Übertragbarkeit auf zukünftige Bauprojekte mit vergleichbaren Nachhaltigkeitszielen.

Flächenverteilung

Die Flächenorganisation der Variante 2 zeichnet sich durch eine deutliche funktionale Klarheit und eine gezielte Priorisierung der pädagogischen Nutzflächen aus. Besonders hervorzuheben ist der stark erhöhte Flächenanteil der Klassenräume, der nun 32 % der gesamten Nutzfläche umfasst. Damit wird ein Schwerpunkt auf den klassischen Lernort gesetzt, wobei diese Räume bewusst in Beziehung zu angrenzenden Übungsflächen und Lagerbereichen gesetzt werden. In dieser Variante sind 19 % der Flächen als Übungsräume vorgesehen, die gezielt an die Klassenräume angedockt und funktional integriert wurden. Die zugehörigen Lagerflächen wurden auf ein Minimum von lediglich 3 % reduziert, was eine bewusste Flächenoptimierung darstellt. Diese Reduktion ist jedoch funktional untersetzt: Lagerbereiche sind gezielt dort vorgesehen, wo sie aufgrund von Nutzungsabläufen tat-

sächlich erforderlich sind, etwa in der Nähe von Fachräumen oder in Verbindung mit den Vorbereitungsflächen.

Für die Lehrkräfte stehen in dieser Variante 9 % der Fläche zur Verfügung, womit sich gegenüber den vorangegangenen Varianten eine qualitative und quantitative Aufwertung des Lehrerbereichs ergibt. Dies reflektiert nicht nur eine gestiegene Wertschätzung der pädagogischen Arbeit, sondern stellt auch räumlich die notwendige Infrastruktur für konzentriertes Arbeiten, Teamarbeit und informellen Austausch zur Verfügung.

Die Erschließungsflächen machen analog zur Variante 1 einen Anteil von 21 % aus, es findet verhältnismäßig keine Zunahme statt. Diese Konstanz erklärt sich aus dem beibehaltenen Grundlayout sowie den Erschließungsstrukturen, die im Sinne der Barrierefreiheit und Übersichtlichkeit ausgebildet wurden. Sie sichern zudem die Anbindung der in den Einschnitten gelegenen Raumzonen, welche durch gezielte Subtraktionen der Baumasse entstanden sind.

Ein auffälliger Wandel vollzieht sich im Bereich der Gemeinschaftsflächen: Diese werden im Inneren auf lediglich 3 % reduziert. Diese scheinbare Einschränkung ist jedoch durch eine starke Erweiterung in den Außenraum relativiert. Insbesondere die Aufwertung des Forumsbereichs sowie die neu geschaffenen Aufenthaltszonen im Kontext der Gebäudeeinschnitte fungieren als qualitativ hochwertige, gemeinschaftlich nutzbare Flächen. Auch wenn sie formell nicht der Kategorie der Innenflächen zugeordnet sind, stellen sie funktional eine direkte Verlängerung des Innenraums dar und unterstützen sowohl das soziale Lernen als auch den informellen Austausch in naturnaher Umgebung. Damit wird ein neues Raumverständnis etabliert, in dem Innen- und Außenraum als gleichwertige Bestandteile eines pädagogisch nutzbaren Gesamtsystems verstanden werden.

Die verbleibenden sonstigen Flächen, wozu Sanitäranlagen, Technik- und Facility-Bereiche unteranderem zählen, machen anteilig 10 % aus. Diese verteilen sich über

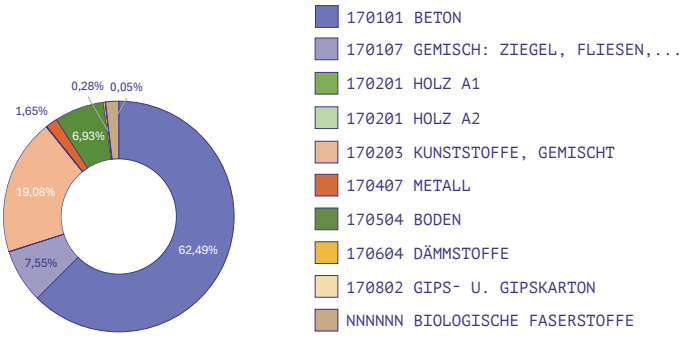
alle Geschosse hinweg und folgen einer effizienten Anordnung entlang der zentralen Erschließungsachsen.

Insgesamt verdeutlicht die Flächenverteilung der Variante 2 ein Konzept, das bewusst zwischen notwendiger Flächeneffizienz und räumlicher Qualität balanciert. Durch die Stärkung der Lern- und Lehrerflächen bei gleichzeitiger Verlagerung informeller Gemeinschaftszonen in den Außenraum entsteht eine räumliche Struktur, die dem zirkulären Anspruch ebenso gerecht wird wie den pädagogischen Anforderungen eines zeitgemäßen Schulbaus.

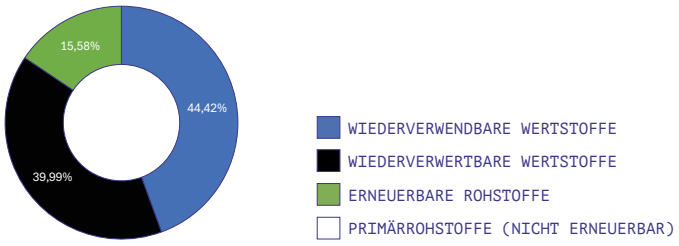
Massen

Die Analyse der Massenverteilung in Variante 2 verdeutlicht deutlich den konstruktiven Wandel, der sich infolge des architektonischen und materialtechnischen Konzepts ergibt. Besonders auffällig ist der signifikante Rückgang des Betonanteils gegenüber der Referenzvariante 0. Während in der Ausgangsvariante Beton rund 83 % der Gesamtmasse ausmachte, reduziert sich dieser Anteil in Variante 2 um knapp 20 %, was einer Gesamtbetonmasse von 3.443,42 Tonnen entspricht. Diese Reduktion ist vor allem auf das Prinzip der gezielten Subtraktion innerhalb der Gebäudekubatur zurückzuführen, bei dem bestimmte Gebäudeteile zurückgebaut und räumlich geöffnet wurden. Dadurch wird die Notwendigkeit schwerer, massiver Bauteile reduziert, was nicht nur Auswirkungen auf das Gesamtgewicht, sondern auch auf die Stoffstromanalyse und die Emissionsbilanz hat.

Parallel dazu steigt der Anteil der Ziegelbaustoffe deutlich an, denn er umfasst nun etwa 7,55 % der Gesamtmasse. Diese Entwicklung ist vor allem auf den Einsatz von Recyclingziegeln in der Fassade sowie die Verwendung von keramischen Shard-Fliesen im Innenausbau zurückzuführen. Auch im Bereich der mineralischen Massen fällt ein deutlicher Zuwachs auf. Besonders hervorzuheben ist der Materialbereich Glas: Der Anteil steigt auf etwa 19,08 % der Gesamtmasse und erfährt damit nahezu eine Verdopplung im Vergleich zu den Varianten 0 und 1. Diese Entwicklung steht im direkten Zusammenhang mit dem gestiegenen Fensterflächenanteil, der maßgeblich



MASSEN NACH ABFALLKATEGORIEN



MASSEN NACH STOFFSTROM

Tab. 22:
Massen-Bilanz

durch die großzügigen Belichtungsöffnungen und die damit verbundenen Einschnitte innerhalb der Gebäudestruktur bedingt ist. Daraus resultierend nimmt auch der Metallanteil leicht zu, da Fensterkonstruktionen im Allgemeinen auf eine Kombination aus Glas und Metallrahmen setzen.

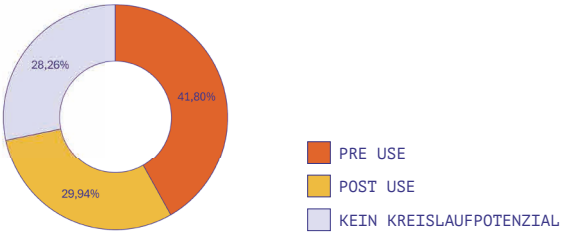
Ein interessanter Aspekt ergibt sich aus der Betrachtung der Dämmstoffe. Auf den ersten Blick scheint der Dämmstoffanteil mit nur 0,28 % ungewöhnlich niedrig. Diese Abweichung ist jedoch auf eine systemische Verschiebung innerhalb der Abfallkategorisierung zurückzuführen: In Variante 2 wird der überwiegende Teil der Dämmmaterialien in Form von Hanffasern realisiert, die gemäß Klassifikation als biologische Faserstoffe und nicht als klassische Dämmstoffe erfasst werden. Dennoch ergibt sich insgesamt ein Massezuwachs der Dämmung im Vergleich zu den Vorvarianten. Diese scheinbare Diskrepanz lässt sich durch einen genaueren Blick auf die physikalischen Materialeigenschaften erklären: Hanfdämmung besitzt typischerweise eine höhere Rohdichte als Glaswolle. Während Glaswolle mit rund 20–40 kg/m³ bemessen wird, weist Hanf eine Rohdichte zwischen 30 und 50 kg/m³ auf. Bei gleicher Volumenschicht bedeutet dies eine höhere Materialmasse – eine Folge, die sich in der Gesamtmasse des Gebäudes bemerkbar macht, obwohl Flächenbereiche wie Fassaden und Dächer aufgrund der Subtraktionen reduziert wurden.

Die stoffstrombasierte Auswertung der Massen zeigt eine deutliche Verschiebung zugunsten der Recyclingfähigkeit. Während der Anteil der Reuse-Materialien gegenüber Variante 1 leicht zurückgeht und nun bei 44,42 % liegt, steigt der Anteil an Bauteilen mit relevantem Recyclinganteil auf beachtliche 39,99 %. Ergänzt wird diese Zusammensetzung durch rund 15,58 % nachwachsende Rohstoffe, vornehmlich Hanf und Lehm. Der Anteil an Primärrohstoffen sinkt in dieser Variante nahezu auf null. Diese Entwicklung reflektiert das übergeordnete Ziel dieser Konstruktionsstrategie: den konsequenten Rückgriff auf Materialien mit hoher Sekundärnutzung oder biologischer Herkunft und damit eine aktive Förderung der Kreislaufwirtschaft.

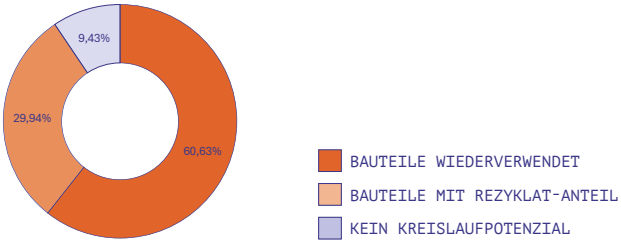
In Summe zeigt sich in Variante 2 eine deutliche Umverteilung der Massen zugunsten ökologisch vorteilhafter Materialien. Die gezielte Reduktion der Betonmassen, der gesteigerte Einsatz rezyklierbarer Baustoffe sowie die Integration von nachwachsenden Rohstoffen verdeutlichen die grundlegende Strategie dieser Variante: die Schaffung eines hochgradig zirkulären und ressourcenschonenden Gebäudes, bei dem Materialwahl und konstruktiver Aufbau in engem Zusammenhang mit Stoffstromeffizienz und langfristiger Rückbaufähigkeit stehen.

Zirkularität

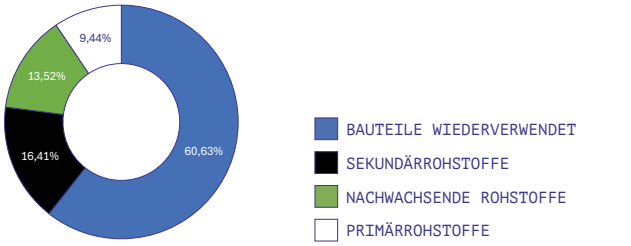
Der Circularity Performance Index (CPX) der Variante 2 liegt bei insgesamt 71,74 % und bewegt sich damit auf einem hohen Niveau zirkulärer Qualität. Zwar liegt dieser Wert geringfügig unter dem der Variante 1, die ihren Fokus vorrangig auf Wiederverwendung gelegt hatte, jedoch verdeutlicht er zugleich eine gezielte Schwerpunktverlagerung zugunsten eines systematisch erhöhten Anteils an Rezyklaten und nachwachsenden Rohstoffen. Der Gesamtwert setzt sich aus einem Pre-Use-Anteil von 41,80 % und einem Post-Use-Anteil von 29,94 % zusammen. Damit wird sichtbar, dass in beiden Bewertungsphasen signifikante zirkuläre Potenziale ausgeschöpft wurden.



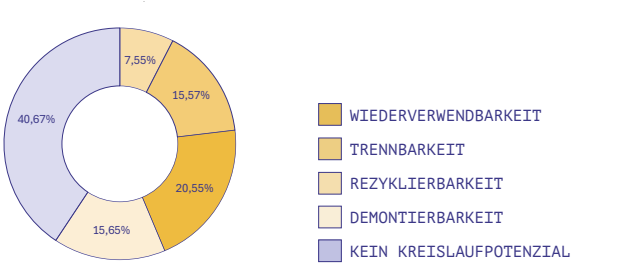
KREISLAUFPOTENZIAL DES GESAMTEN GEBÄUDES



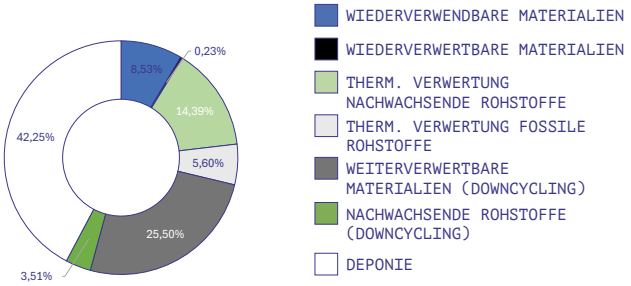
PRE USE - CPX



PRE USE - STOFFSTROM



POST USE - CPX



POST USE - STOFFSTROM

Tab. 22:
CPX-Bilanz

Im Pre-Use-Bereich wird ein Großteil der Gebäudemasse entweder wiederverwendet oder besteht aus Materialien mit hohem Rezyklatanteil. Rund 60,63 % der Masse stammen aus wiederverwendeten Bauteilen, während weitere 29,94 % durch die Integration von Baustoffen mit Sekundärrohstoffanteilen positiv in die Zirkularitätsbewertung einfließen. Dieser hohe Anteil spiegelt das grundlegende Konzept von Variante 2 wider, das darauf abzielt, industrielle und natürliche Stoffkreisläufe konsequent zu schließen, die entweder durch geschlossene technische Kreisläufe (Recycling und Reuse) oder durch biologische Kreislaufoptionen (z. B. kompostierbare Dämmstoffe) bewusst recherchiert und geplant werden.

Im Post-Use-Bereich ergibt sich jedoch ein Rückgang von etwa 2 Prozentpunkten im Vergleich zu Variante 1.

Hier sinken insbesondere die Werte für Rezyklierbarkeit, Wiederverwertung und Demontierbarkeit. Auffällig ist, dass dieser Rückgang trotz eines hohen Materialeinsatzes mit Recyclingpotenzial stattfindet. Die Ursache liegt im Detail der Bauteilebene: Variante 2 zeigt sich in vielen Bauteilgruppen, was vor allem bei Wand-, Decken- und Bodenaufbauten zu sehen ist, zwar als sehr recyclingfähig, verliert jedoch beim Dach an Qualität. So wurde in dieser Variante auf den Einsatz vorgehängter Trapezbleche verzichtet und stattdessen ein tragender Dachabschluss in Stahlbeton gewählt. Diese Entscheidung führt zu einem Rückgang der Rezyklierbarkeit des Dachaufbaus um rund 9 %. Zusätzlich fällt in dieser Variante ein Teil der potenziell kompostierbaren Gründachfläche weg, da durch die subtraktive Reduktion der Gebäudemasse auch Dachfläche verloren geht. Somit verringert sich die Masse, die in der Nachnutzung einem biologischen Kreislauf zugeführt werden könnte.

Diese Entwicklung überträgt sich konsequent auch auf die Bewertung der Wiederverwertung und der Demontierbarkeit: Während Metall wie in Variante 1 durch sortenreine Trennung und hohe Marktgängigkeit in beiden Kategorien sehr gut abschneidet, zeigt sich bei Beton ein deutlich schlechteres Bild. Betonbauteile, die im Bestand verbleiben oder neu eingebracht werden, lassen sich zwar theoretisch durch Recycling wiederverwerten (insbesondere als RC-Zuschlag im neuen Beton), sind jedoch durch ihre dauerhafte Verbindung mit anderen Bauteilschichten schwer zu demontieren und häufig nur im Downcycling verwendbar. Die Entscheidung für einen monolithischen Dachaufbau aus Beton verschlechtert damit insbesondere den Demontierbarkeitsindex im Post-Use deutlich.

Positiv hervorzuheben sind hingegen die Materialentscheidungen in den übrigen Bauteilschichten. So tragen insbesondere die Verwendung von Hanffaser-Dämmung, Lehmbauplatten und modular rückbaufähigen Elementen wie Reapor-Platten, Trockenestrich oder Shard-Fliesen signifikant zu einer verbesserten Zirkularitätsbewertung bei. Diese Baustoffe sind nicht nur recyclingfähig

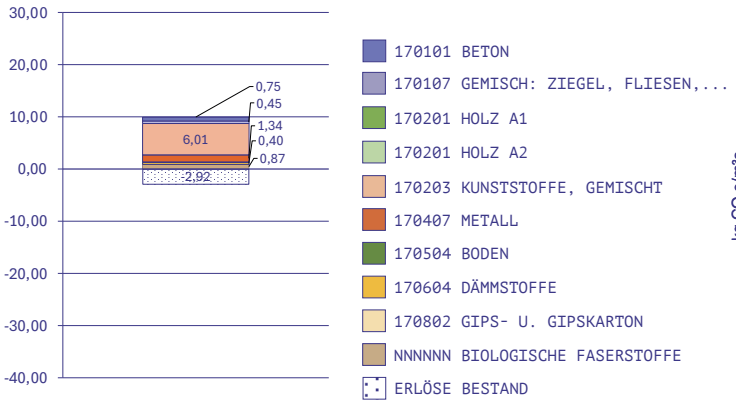
oder kompostierbar, sondern zeichnen sich auch durch eine sortenreine Rückbaupotenz aus. Die Kombination aus loser Verlegung (z. B. bei Fliesen) und mechanisch reversiblen Befestigungen (etwa bei Windpapier oder Deckenelementen) erleichtert die spätere Trennung und ermöglicht die vollständige stoffliche Wiederverwertung. Weitere Untersuchungen bezüglich der einzelnen Bauteile können dem Anhang entnommen werden.

Insgesamt ergibt sich somit ein differenziertes Bild: Die Variante 2 überzeugt durch einen sehr hohen Anteil an Rezyklaten und wiederverwendbaren Materialien im Pre-Use, schwächt jedoch ihr Zirkularitätsprofil im Post-Use durch weniger flexible Konstruktionsprinzipien in einzelnen Bereichen wie dem Dach. Dennoch belegt die Variante eindrucksvoll das Potenzial einer konsequent recyclingorientierten Bauweise und stellt damit einen bedeutenden Schritt in Richtung geschlossener Stoffkreisläufe im Bauwesen dar.

Treibhausgase

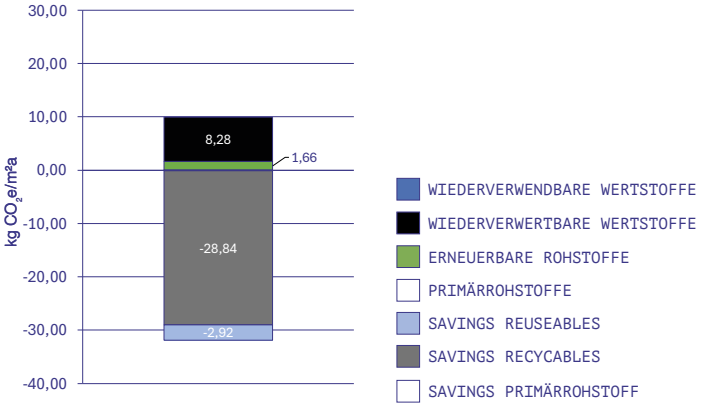
Die Variante 2 zeigt in besonderer Weise, welches Potenzial die konsequente Integration von Recyclingmaterialien für die Treibhausgasbilanz eines Gebäudes birgt. Durch gezielte Materialentscheidungen, bei denen Rezyklatanteile nicht nur toleriert, sondern aktiv bevorzugt eingesetzt werden, sinkt das Global Warming Potential (GWP) dieser Variante signifikant auf 9,95 $kgCO_2e/m^2a$. Im Vergleich zu den vorherigen Varianten markiert dieser Wert eine deutliche Verbesserung und verdeutlicht den direkten Zusammenhang zwischen zirkulärer Materialwahl und klimarelevanten Emissionen, was insbesondere auch im Bereich der Herstellungsphase zu bemerken ist.

Die GWP-Berechnungen basieren auf einer Kombination aus von Concular bereitgestellten theoretischen Kennwerten sowie eigens recherchierten Werten für Materialien mit dokumentierten Rezyklatgehalten. Ziel war es, die Emissionswerte realitätsnah abzubilden und insbesondere die Unterschiede in der Herstellungsphase herauszuarbeiten, die durch den Einsatz von Recyclingmaterialien entstehen. Die daraus resultierende Reduktion erklärt



GESAMT: 9,95 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -2,92 kgCO₂e/m²a

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN



GESAMT: 9,95 kgCO₂e/m²a
ERLÖSE: -31,91 kgCO₂e/m²a

GWP NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	GWP total (kg CO_2e)/m2	GWP total (kg CO_2e)/m2*a
170101 Beton	37,62	0,7524778
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	22,57	0,4513891
170201 Holz A1	0,00	0
170201 Holz A2	0,00	0
170203 Kunststoffe, gemischt	0,72	0,0143083
170407 Metall	67,05	1,3410205
170604 Dämmstoffe	19,89	0,3977946
170802 Gips- u. Gipskarton	0,26	0,005186
170904 Baumischabfall	0,00	0
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	43,64	0,8728924
170202 Glas	300,31	6,0062266
170504 Boden	5,62	0,1124966
Erlöse Bestand	-146,14	-2,922893
Gesamt		7,03

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,60
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,16
Primärrohstoff	28,86
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-0,01
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

GWP NACH STOFFSTROM

Tab. 23:
GWP-Bilanz

sich nicht nur durch die geringere Primärenergieintensität der verwendeten Baustoffe, sondern auch durch die Vermeidung emissionsreicher Prozesse wie das Brennen, Einschmelzen oder energieintensive Trocknungsphasen.

Ein Blick in die Stoffstromanalyse bestätigt die Wirksamkeit dieser Strategie: Zu den bereits bekannten Einsparungen durch Bestandsübernahme etwa 4,06 kgCO_2e/m²a gesellt sich nun ein zusätzlicher Klimavorteil in Höhe von rund 28,86 kgCO_2e/m²a, der sich aus der gezielten Verwendung recyclingintensiver Materialien ergibt. Diese Entwicklung unterstreicht die Bedeutung eines systematischen Rückführens von Bauabfällen in den Stoff-

kreislauf als Sekundärrohstoffe für neue Bauteile.

Besonders hervorzuheben ist die Rolle der Fenster, deren ökologische Qualität sich erheblich verbessert hat. Fenster zählen aufgrund ihrer großen Flächenanteile und komplexen Materialität zu den GWP-intensivsten Bauteilen im Hochbau. In Variante 2 wurde bewusst auf moderne Fensterkonstruktionen mit hohem Sekundärmaterialanteil gesetzt. So zeigt etwa der Einsatz von Aluminiumrahmen aus sogenanntem „Closed-Loop“-Recycling, wie sie von den lokalen Herstellern wie Schüco angeboten werden. eine massive CO_2-Reduktion im Vergleich zu Primäraluminium. Statt etwa 150 kg CO_2-eq/m^2 fallen durch den Einsatz von Recyclingaluminium nur rund 50 kg CO_2-eq/m^2 an. Auch beim Fensterglas lassen sich durch die Verwendung von recyceltem Cullet (Glasbruch) Einsparungen von 15–25 % gegenüber konventionellem Floatglas erzielen un das ohne Einbußen bei Qualität oder Lebensdauer.

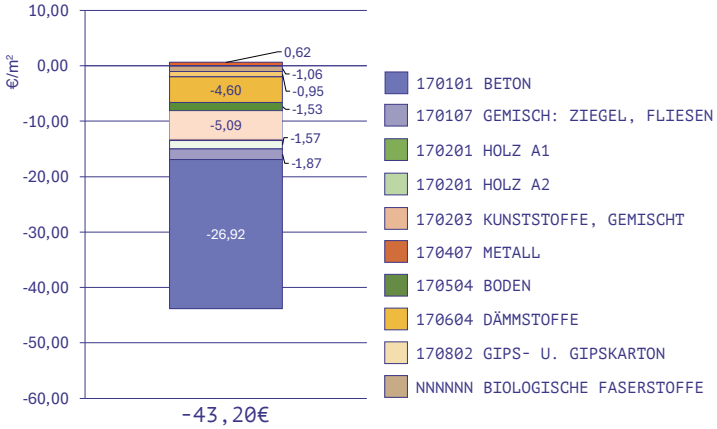
Darüber hinaus zeigt auch der Einsatz innovativer Ausbauprodukte wie Reapor-Platten aus geschäumtem Altglas erhebliche Vorteile im Hinblick auf das GWP. Die nahezu 100 % recycelten Platten weisen nicht nur eine hervorragende akustische und brandschutztechnische Leistung auf, sondern verursachen in der Herstellung signifikant weniger CO_2-Emissionen als vergleichbare mineralische Produkte. Die niedrigeren Schmelztemperaturen bei der Glasaufbereitung sowie die Möglichkeit zur vollständigen Rückführung in den Stoffkreislauf nach der Nutzung reduzieren die Umweltlast zusätzlich und machen Reapor zu einem Paradebeispiel ressourcenschonender Produktinnovation.

Ein weiterer Baustein der emissionsarmen Bauweise in Variante 2 ist der Einsatz von Trockenestrichsystemen mit hohem Recyclinganteil. Herkömmliche Nassestriche, die auf Zement oder Primärgips basieren, sind äußerst energieintensiv in der Herstellung und mit entsprechend hohen Emissionswerten belastet. Trockenestrichplatten aus Sekundärgips oder -faserstoffen hingegen können das GWP um bis zu 60 % reduzieren. Die Vermeidung

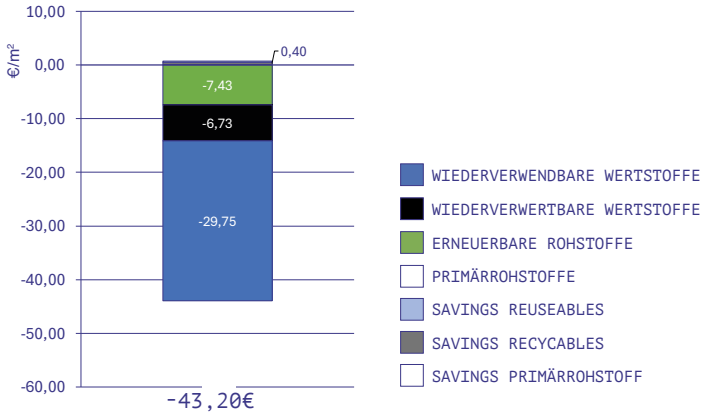
Tab. 24:
Kosten-Bilanz

Bauteil	Baukosten (€/gesamt)	Rückbau (€)	Entsorgung (€)	Rückbau- und Entsorgungskosten Rückbau nach 50 Jahren (€/gesamt)	Gesamt (€/gesamt)
Außenwand	695.924,58 €	935.984,97 €	91.677,65 €	1.027.662,62 €	1.723.587,20 €
Bodenplatte	918.777,20 €	701.307,25 €	182.976,60 €	884.283,84 €	1.803.061,04 €
Decken	1.367.053,97 €	1.005.140,58 €	142.229,48 €	1.147.370,07 €	2.514.424,04 €
Dach	1.652.107,75 €	1.126.750,21 €	130.649,38 €	1.257.399,59 €	2.909.507,34 €

GESAMTKOSTEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
170101 Beton	-26,92
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	-1,87
170201 Holz A1	0,00
170201 Holz A2	-1,57
170203 Kunststoffe, gemischt	-5,09
170407 Metall	0,62
170604 Dämmstoffe	-4,60
170802 Gips- u. Gipskarton	-0,95
170904 Baumischabfall	0,00
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	-1,06
170202 Glas	-0,23
170504 Boden	-1,53
170302 Bitumengemische	0,00
Gesamt	-43,20

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	-29,749756
wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	-10,564038
Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	-7,4306335
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	0,22
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,40
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Savings Primärrohstoff	0,09

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

von Trocknungszeiten und der Einsatz trockener, modulartauglicher Verlegungstechniken verbessern nicht nur die Klimabilanz während der Bauphase, sondern erleichtern auch die spätere Wiederverwertung oder stoffliche Rückführung nach dem Rückbau.

Diese positive Bilanz wird gestützt durch das integrale Materialkonzept der Variante 2: Viele Baustoffe von Hanfdämmung über Shard-Fliesen bis zu Lehmplatten sind entweder biologisch abbaubar, sortenrein recycelbar oder in einem Closed-Loop-Prozess wiedereingliederbar. Dadurch sinkt nicht nur das GWP der Herstellung, sondern es entstehen auch keine zusätzlichen Emissionen am Ende des Lebenszyklus durch aufwendige Entsorgung oder thermische Verwertung.

Insgesamt demonstriert Variante 2 eindrucksvoll, wie die konsequente Anwendung kreislauffähiger Materialien in sowohl technischer als auch biologischer Natur nicht nur die Zirkularität, sondern auch den ökologischen Fußabdruck eines Gebäudes substanziell verbessern kann. Die Reduktion auf nur 9,95 $kgCO_2e/m^2a$ unterstreicht das enorme Potenzial einer Recycling-orientierten Materialstrategie für den Klimaschutz im Bauwesen.

Wirtschaftlichkeit

Die Kostenanalyse der Variante 2 offenbart erneut die hohe Relevanz der Massenverteilung innerhalb des Gebäudes für die resultierenden Verwertungskosten. In deisem Fall liegen Verwertungskosten von 43,20 €/m^2 vor. Zwar sinkt durch die subtraktive Reduktion der Betonmasse und damit einhergehend der Rückbauvolumina der absolute Wert der Entsorgungskosten im Vergleich zu Variante 0 und 1, dennoch bleibt der Beton weiterhin der dominierende Kostenfaktor, wie man mit 26,92 €/m^2 sieht. Dies liegt vor allem an seiner schieren Masse: Trotz aller konstruktiven Optimierungen stellt der mineralische Baustoff den größten Volumen- und Masseanteil und bleibt somit auch wirtschaftlich der maßgebliche Treiber im Rückbau. Das ist unteranderem darauf zurück zu führen, dass im Bereich des Daches alternativ in dieser Variante eine Betondecke eingezogen wurden, um den Abschluss mit ei-

ner Tragebene nach oben zu bilden. Das Ziel war, mehr von der subtrahierten Masse als Recyclingmaterial einzusetzen und zu untersuchen.

Ein differenzierter Blick auf die stoffliche Zusammensetzung der eingesetzten Materialien zeigt allerdings, dass bestimmte Designentscheidungen auch positive Effekte auf die Wirtschaftlichkeit der Entsorgungsphase haben. Besonders hervorzuheben ist hier der Einsatz von Hanf als Dämmstoff. Die Wahl biologischer Faserstoffe wirkt sich nicht nur ökologisch vorteilhaft aus, sondern reduziert auch die finanziellen Belastungen im Rückbau. Während konventionelle Dämmstoffe wie Mineralwolle mit bis zu 1.496 €/t zu Buche schlagen, liegt der durchschnittliche Verwertungssatz von Hanfdämmung bei lediglich 54 €/t. Dieser drastische Unterschied relativiert sogar die insgesamt höhere Masse der Hanfdämmung, die sich aus der höheren Rohdichte gegenüber Glas- oder Mineralwolle ergibt. Die niedrigen Entsorgungskosten tragen somit zur Stabilisierung der Gesamtbilanz bei was erkennbar positiver Effekt ist, der sich ökonomisch wie ökologisch als wirksam erweist.

Allerdings können diese Einsparungen nicht vollständig kompensieren, dass an anderer Stelle zusätzliche Belastungen entstehen: Durch die signifikante Erhöhung des Ziegelanteils sowohl durch die Fassadenkonstruktion als auch durch keramische Bodenmaterialien wie Shard-Fliesen steigen die spezifischen Verwertungskosten in diesem Segment auf 1,87 €/m² an. Die thermisch oder mechanisch schwer rückführbaren Eigenschaften keramischer Baustoffe führen dazu, dass sie auf Deponiekostenebene höher belastet sind als z. B. metallische oder rein mineralische Materialien. Diese Verschiebung innerhalb der Materialgruppen bringt damit eine Umverteilung der Entsorgungskosten mit sich.

Hinzu kommt, dass im Unterschied zur Variante 1 kein Metall mehr in der Fassade zum Einsatz kommt. Dadurch sinkt das wirtschaftlich verwertbare Metallvolumen auf 0,62 €/m², was sich direkt negativ auf die Verwertungserlöse auswirkt. Während in Variante 1 die Metallfassade noch einen verhältnismäßig hohen Erlös von 1,93 €/m² generieren konnte, ist dieser in Variante 2 deutlich reduziert, da die Fenster allein keine aus-

reichende Masse erzeugen, um signifikante Einnahmen zu erzielen. Die Einsparpotenziale im Bereich der Reusables sind somit zwar weiterhin gegeben, reduzieren sich aber im Vergleich zum vorhergehenden Szenario.

Ein Abgleich mit der stoffstrombasierten Analyse zeigt zudem, dass die Verwertungskosten im Wesentlichen durch die Reusables mit 29,75 €/m² geprägt werden, da diese zwar potenziell wiederverwendbar sind, jedoch häufig eine aufwendige Aufbereitung erfordern, deren Kosten höher ausfallen als bei direkt recycelbaren Stoffen. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass die Recycables in Variante 2 nur begrenzte Erlöse von 0,40 €/m² erzielen, was schon durchaus ein struktureller Nachteil darstellen kann, der mit der Marktverfügbarkeit und den begrenzten Handelsvolumina für Sekundärrohstoffe zusammenhängt.

Ein weiteres Kostenfeld betrifft die nachwachsenden Rohstoffe, deren Verwertungskosten im Vergleich zu fossilen oder mineralischen Baustoffen zwar grundsätzlich niedriger liegen, in dieser Variante aber erstmals in signifikanter Menge von 7,43 €/m² auftreten. Die Erhöhung der Masseanteile biologischer Faserstoffe wie Hanf, Lehm oder Holz führt dazu, dass ihre Verwertungskosten im aggregierten Modell nun erstmals spürbar ausfallen. Gleichwohl handelt es sich hierbei um kontrollierbare Größen, die durch etablierte Rückführungssysteme oder Kompostierung kosteneffizient gestaltet werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die wirtschaftliche Bewertung der Variante 2 von einer ambivalenten Entwicklung geprägt ist: Die konsequente Reduktion emissionsintensiver Materialien wie Beton und die verstärkte Integration biogener Stoffe erzeugen auf der einen Seite relevante Einsparpotenziale, insbesondere im Entsorgungsbereich. Auf der anderen Seite reduziert sich die Erlösstruktur durch den Wegfall metallischer Fassadenkomponenten, und durch den wachsenden Anteil nicht-marktgängiger Reusables entstehen Aufbereitungs- und Trennungskosten, die die Gesamtkalkulation belasten. Dennoch bleibt die Variante aufgrund ihrer hohen ökologischen Qualität ein wirtschaftlich denkbares Modell, wenn vorausgesetzt ist, dass zukünftige Rückbauprozesse und stoffliche Kreisläufe konsequent geplant und durch förderliche Marktmechanismen flankiert werden.

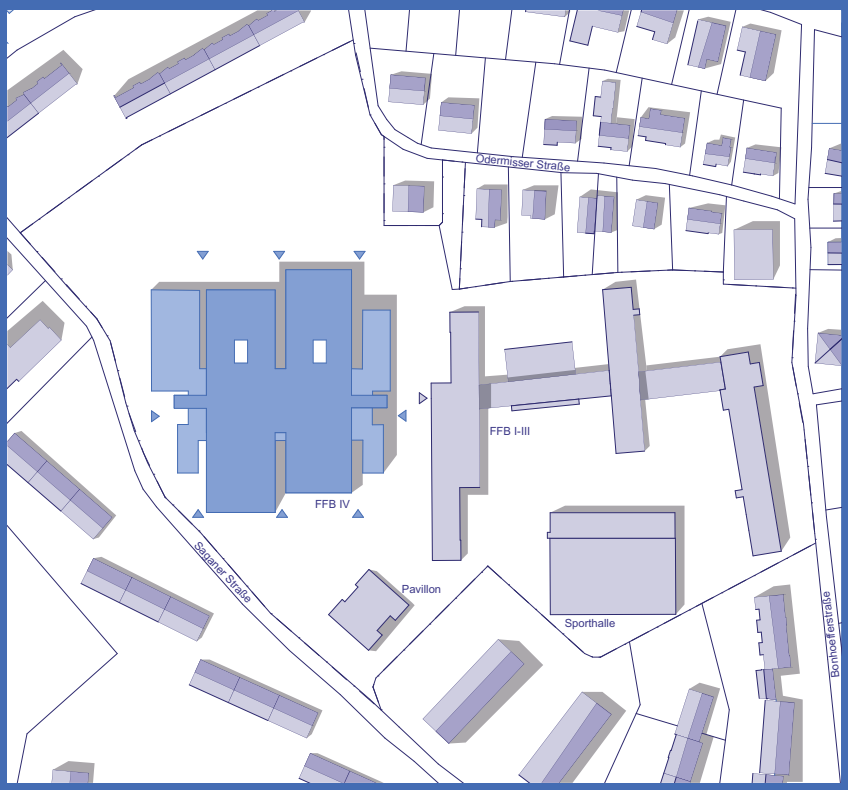


Abb. 124:
Perspektive
auf den
Eingangsbereich

5.3.4 Variante 3: Lightning Up

Architektur

Variante 3 untersucht exemplarisch das Potenzial einer vertikalen Erweiterung des Bestandsgebäudes unter Berücksichtigung neuer Raumansprüche und einer konsequent kreislauffähigen Bauweise in modularer Holzbauweise. Zentraler Gedanke dieser Variante ist die gezielte Aufstockung des bestehenden Baukörpers durch additive Elemente, um neuen Nutzungen wie unteranderem durch zusätzlichen Lehr-, Gemeinschafts- oder Verwaltungsflächen angemessen Raum zu bieten. Die architektonische Umsetzung erfolgt dabei in bewusster Bezugnahme auf die städtebauliche Struktur des benachbarten Gebäudeensembles FFB I–III, das durch eine fingerartige, rhythmisch gegliederte Gebäudestruktur gekennzeichnet ist. Diese formale Logik wird in Variante 3 aufgenommen und in adaptierter Form durch die neu angeordneten Holzbaumodule fortgesetzt, wodurch sich eine gestalterisch wie strukturell kohärente Erweiterung ergibt, die sich in die bestehende städtebauliche



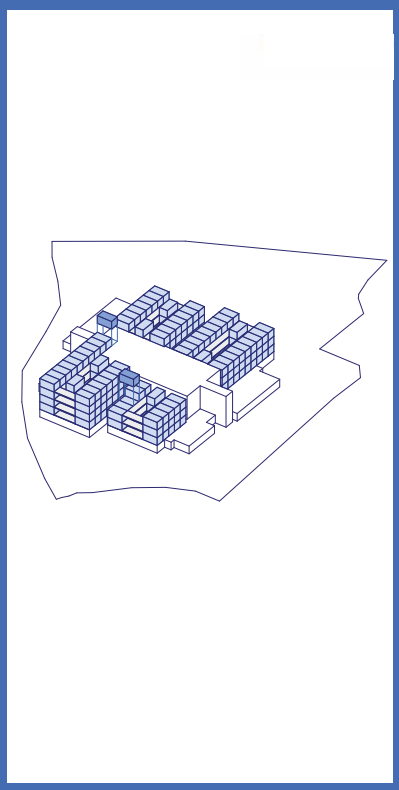


Abb. 125: Lageplan zur Variante 2, maßstabslos

Abb. 126: Piktogramm Varianten Schwerpunkt

Situation sensibel einfügt.

Bereits der Bestandskörper bietet durch seine nicht durchgängig geschlossene Kontur im Erd- und Untergeschoss eine gewisse formale Offenheit, die für die Aufnahme der neuen Struktur geeignet erscheint. Durch das bestehende regelmäßige Stützenraster lässt sich die neue Lastverteilung der aufgesetzten Module baustatisch effizient aufnehmen, was die Voraussetzung für eine statisch und wirtschaftlich sinnvolle Aufstockung schafft. Gleichzeitig entstehen durch gezielt gesetzte Einschnitte zwischen den neu geschaffenen Gebäudefingern attraktive Licht- und Belichtungshöfe, die nicht nur die oberen Geschosse, sondern auch die tieferliegenden Nutzungen im Untergeschoss mit Tageslicht versorgen. Die Qualität der neu geschaffenen Räume orientiert sich also bewusst an funktionalen wie atmosphärischen Ansprüchen.

Die Module selbst sind als transportoptimierte Holzkörper mit einer Breite von 2,40 m konzipiert, was ihrer lo-



Abb. 127:
Grundriss EG zur
Variante 3,
maßstabslos

FLÄCHENVERTEILUNG IN M²

	EG	UG	OG
KLASSEN	355	145	315
ÜBUNGSRAUM	248	194	183
VORBEREITUNG/LAGER	521	106	239
LEHRER	369	297	96
ERSCHLIESSUNG	1864	924	1109
GEMEINSCHAFT	1387	435	1408
SONSTIGES	440	252	200
GESAMT	**5184**	**2353**	**3550**

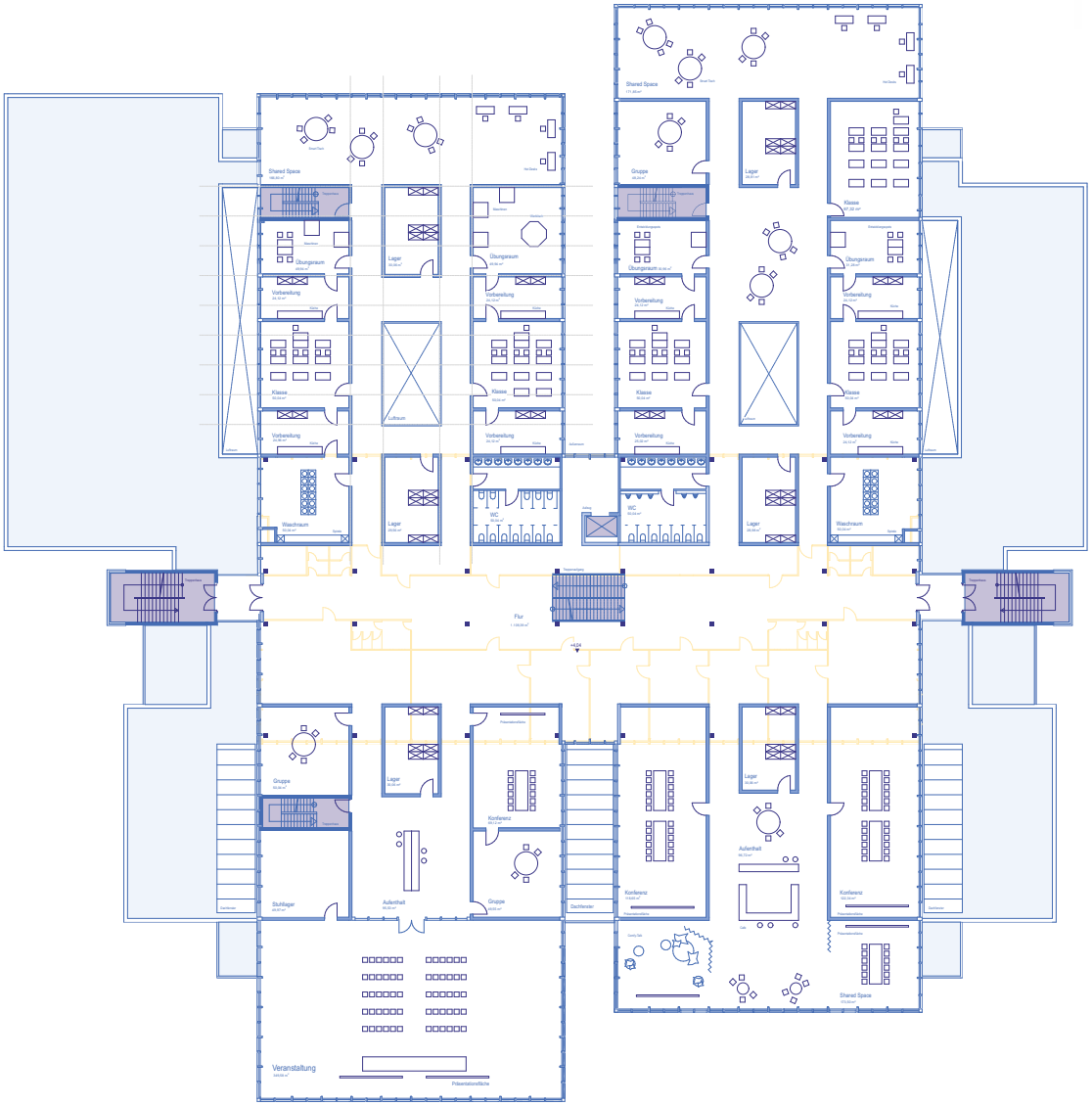


Abb. 128:
Grundriss OG zur Variante 3, maßstabslos

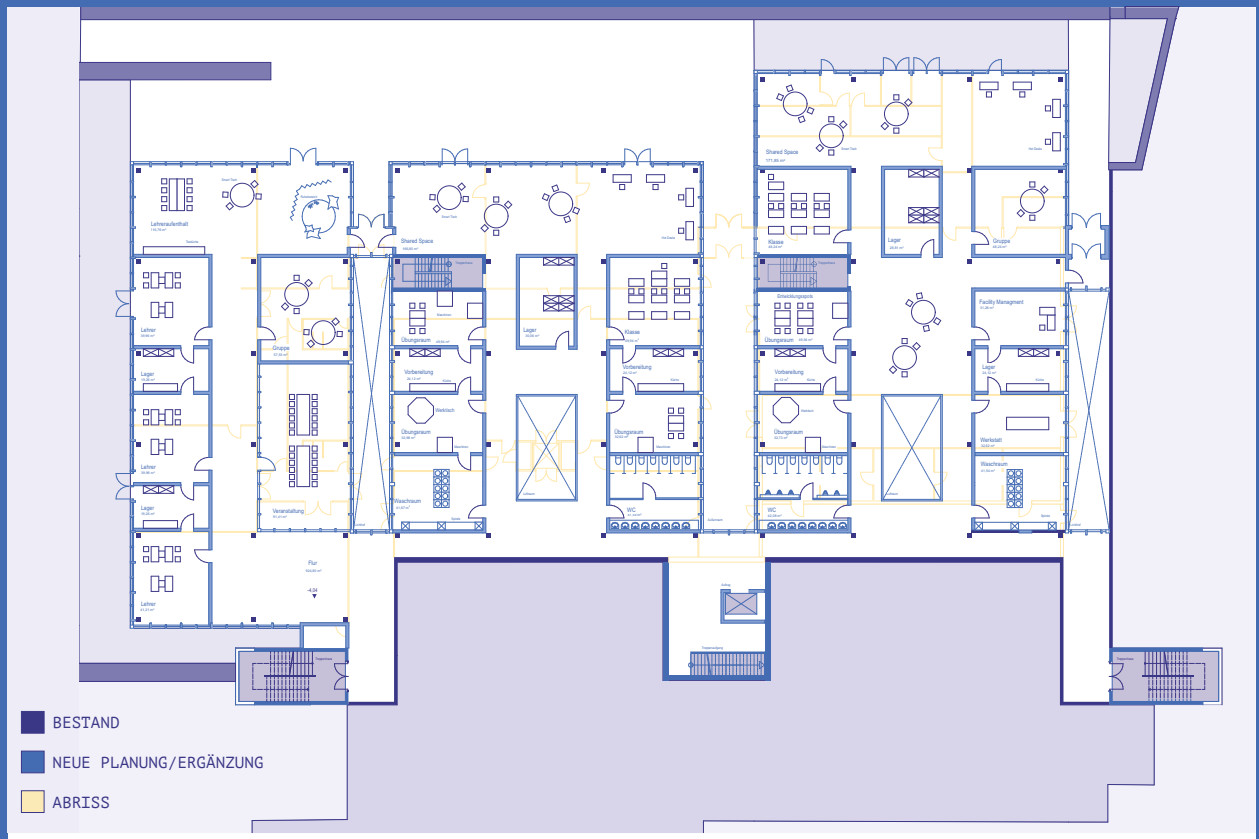


Abb. 129:
Grundriss OG zur Variante 3, maßstabslos

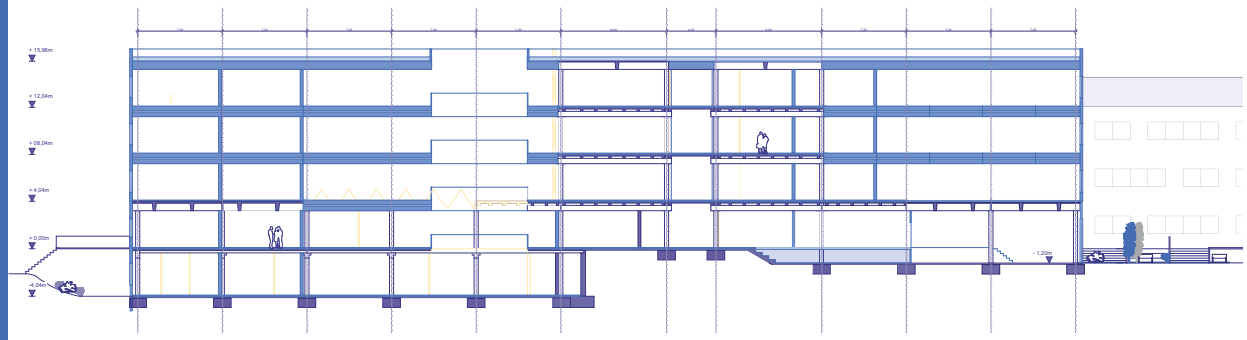


Abb. 130:
Schnitt, maßstabslos

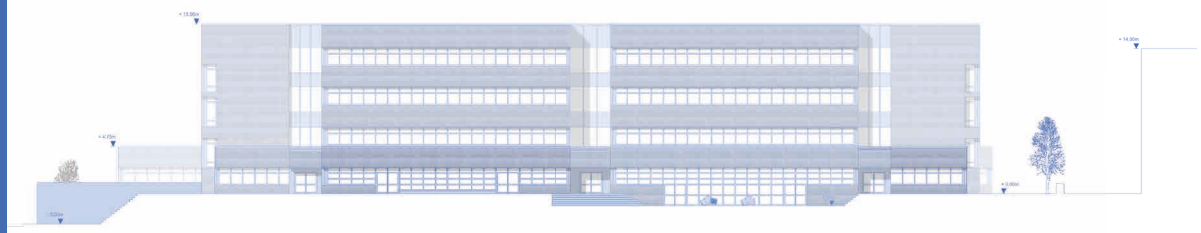


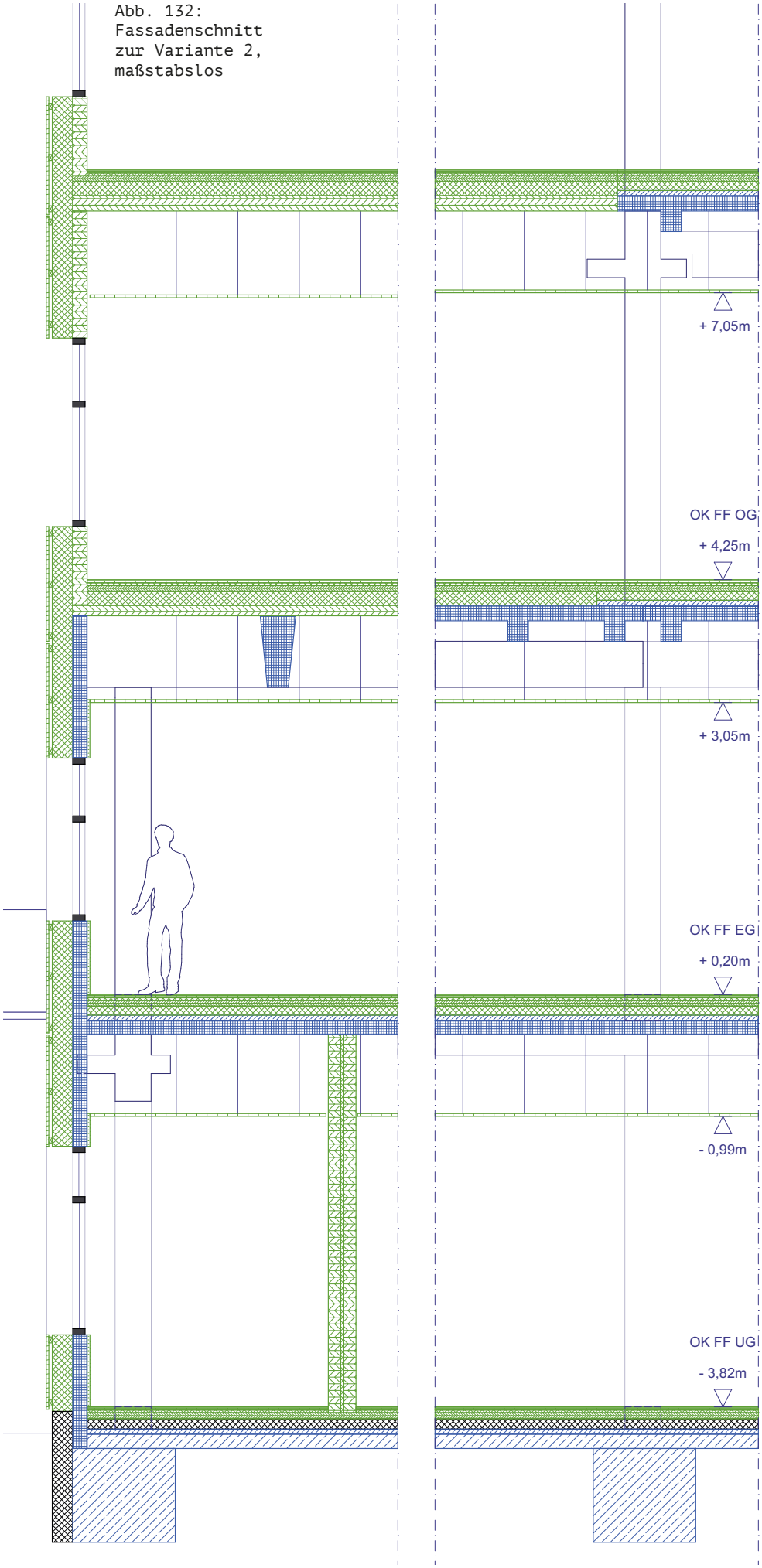
Abb. 131:
Ansicht Süd, maßstabslos

gistischen Realisierbarkeit auf einem herkömmlichen Lkw entspricht. Diese Maße passen zugleich optimal in das bestehende Gebäuderaster von 1,20 m, wodurch sich planerisch eine hohe Kompatibilität mit der Tragstruktur ergibt. Die Modulstruktur wird vertikal gestapelt, wobei die Erschließungszonen als eigenständige Deckenelemente zwischen die Raummodule eingefügt werden. Dies ermöglicht einen hohen Vorfertigungsgrad, da die Module unabhängig voneinander produziert und anschließend effizient auf der Baustelle montiert werden können. Gleichzeitig erlaubt das modulare System eine hohe Flexibilität in der Nutzung: Die vorgeschlagene Rasterung bietet die Option, auch klassische Bürostrukturen zu realisieren. So kann im Rahmen der Aufstockung nicht nur schulischer Raum geschaffen werden, sondern es entsteht ein multifunktionales Gebäudesystem, das auch außerschulischen Nutzungen offensteht.

Im Inneren entwickeln sich durch die modulare Struktur zellulare Raumbereiche mit unterschiedlichen Größen und Nutzungsqualitäten. Es entstehen klassische Klassenräume, Gruppenräume, Übungsräume und gezielt platzierte Lagerflächen. Die funktionale Vielfalt wird ergänzt durch die Anordnung von Waschräumen und offenen Gemeinschaftsflächen an den Enden der Gebäudefinger, wodurch ein räumlich-pädagogischer Mehrwert entsteht, der sowohl individualisiertes Lernen als auch kooperative Arbeitsformen unterstützt. Besonders hervorgehoben ist ein zentraler Bereich für die Lehrerschaft, der sowohl offene Arbeitslandschaften als auch einen Veranstaltungsbereich umfasst und somit neue Qualitäten für Kollaboration und Rückzug schafft.

Im Erdgeschoss wird das Konzept einer funktionalen Trennung zwischen öffentlichen und schulischen Bereichen beibehalten. Die gemeinschaftlichen Nutzungen Mensa, Veranstaltungsraum, Bühnenbereich sind als separate Baukörper in Holzbauweise ausgebildet, jedoch gestalterisch und funktional in enger Verbindung mit dem übrigen Gebäude. Auch hier entsteht durch großzügige Öffnungen und gezielte Fassadengestaltung eine enge Beziehung zum Außenraum, der nicht nur als

Abb. 132:
Fassadenschnitt
zur Variante 2,
maßstabslos



AUSSENWAND BETON
U= 0,18 W/M²K

REUSE-HOLZFASSADE	20
WINDPAPIER	<1
STROHMATTEN	200
STAHLBETON	140
LEHMBAUPLATTE	22

DACH
U= 0,18 W/M²K

GRANULAT GRÜNDACH	200
GRAUPAPPE	<1
STROHMATTEN	200
BRETTSCHICHTHOLZ	100
ABHÄNGESYSTEM	
LIGNOTREND	20

DECKEN HOLZ

LINOLEUM	4
SPANPLATTE	16
TRITTSCHALL STROH	60
BRETTSCHICHTHOLZ	100
STROH	150
BRETTSCHICHTHOLZ	120
ABHÄNGESYSTEM	
LIGNOTREND	20

DECKEN BETON

LINOLEUM	4
SPANPLATTE	16
TRITTSCHALL STROH	60
BRETTSCHICHTHOLZ	100
STROH	150
ESTRICH	40
STAHLBETON	100
ABHÄNGESYSTEM	
LIGNOTREND	20

INNENWAND

BRETTSCHICHT	100
STROH	30

BODEN
U= 0,14 W/M²K

LINOLEUM	4
SPANPLATTE	16
TRITTSCHALL STROH	60
RETTSCHICHTHOLZ	100
MINERALWOLLE	200
ESTRICH	40
GRÜNDUNG STB	200

Erschließungsfläche, sondern als aktiv nutzbare Erweiterung des Innenraums konzipiert ist. Die Versiegelung wird durch grüne Flächen ersetzt, wobei sich eine organisch modellierte Außenraumgestaltung an das bereits etablierte Landschaftsbild der FFB I–III anschließt. Damit wird nicht nur eine kontinuierliche Freiraumqualität geschaffen, sondern auch ein identitätsstiftender Kontext, der das gesamte Ensemble als gestalterisch und funktional zusammenhängende Einheit erscheinen lässt.

Diese gestalterische wie funktionale Stringenz setzt sich auch im Untergeschoss fort. Die dortige Struktur bleibt erhalten, wird jedoch durch verbesserte Belichtung, neue Nutzungszuweisungen sowie funktionale Ergänzungen etwa in Form von erweiterten WC-Anlagen und Facility-Bereichen qualitätsvoll aufgewertet. In den Obergeschossen schließlich spiegelt sich die gedachte Struktur der Aufstockung: Neben den Lernbereichen öffnet sich der Baukörper zur prominent gelegenen Außenfläche hin mit großzügigen Veranstaltungs-, Aufenthalts- und Cafébereichen. Diese ermöglichen nicht nur die Durchführung schulinterner Veranstaltungen in unterschiedlichen Formaten, sondern bieten auch Raum für externe Nutzungen durch Akteure aus dem Quartier oder der Nachbarschaft. Die Variante 3 schafft auf diese Weise einen hochflexiblen, identitätsstiftenden Lern- und Arbeitsort, der auf funktionale Anforderungen ebenso reagiert wie auf städtebauliche Bezüge – und gleichzeitig durch seine modulare Systematik zukunftsweisende Bauprinzipien zirkulären Bauens verkörpert.

Konstruktion

Die konstruktive Ausgestaltung der Variante 3 stellt besondere Anforderungen, da sie sowohl auf der bestehenden Stahlbetonstruktur des Bestandsgebäudes aufbaut als auch die neu geplanten modularen Holzbauelemente integriert. Die Herausforderung besteht dabei nicht nur in der konstruktiven Kompatibilität der beiden Systeme, sondern auch in der Umsetzung eines zirkulären und regional verankerten Bauansatzes. Aus diesem Grund wurde besonderer Wert auf eine durchdachte Kombination von Vorfertigung, Wiederverwendung und regional ver-

fügbaren Naturbaustoffen gelegt. Der Fokus liegt insbesondere auf einer hohen Vorfertigungstiefe, was eine präzise Abstimmung der Bauteilsysteme sowie der Verbindung zwischen Bestand und Aufstockung notwendig macht.

Im Bereich der Außenwandkonstruktion zeigt sich exemplarisch der zweischichtige Aufbau: Die vorhandene Stahlbetonstruktur des Bestands wird nachträglich mit einer natürlichen Dämmlage aus Stroh versehen. Stroh erfüllt dabei gleich mehrere Anforderungen: Es ist nicht nur ein regional gut verfügbarer, nachwachsender Rohstoff mit sehr guter ökologischer Bilanz, sondern auch bauphysikalisch leistungsfähig in Bezug auf Wärmeschutz und Diffusionsoffenheit. Die Auswahl fiel bewusst auf hochverdichtete Strohplatten, in den Bereichen, wo es höherer Anforderungen Bedarf, die auch ohne chemische Zusätze formstabil und brandschutztechnisch zulässig sind. Derartige Bereiche sind beispielsweise die Bodenplattendämmung. Stroh bietet da inzwischen eine Palette an verschiedenen Dämmmöglichkeiten für diverse Einsatzgebiete Den äußeren Abschluss bildet eine REUSE-Holzfassade, die aus wiederverwendeten Vollholz-Elementen besteht. Die Besonderheit liegt in der geplanten Systematisierung der Längen: Um trotz unterschiedlicher Herkunft der Reuse-Elemente ein einheitliches Fassadenbild zu erzielen, wird auf eine horizontale Ausrichtung der Holzlamellen gesetzt, wobei standardisierte Längen angestrebt werden. Dieses Prinzip erlaubt sowohl ästhetische Ordnung als auch konstruktive Einfachheit im Umgang mit Second-Hand-Materialien.

Analog zur Bestandssituation wird auch die Außenwand der neu aufgesetzten Holzbaumodule konstruiert. Hier ersetzt ein Brettschichtholzelement das in der Bestandsstruktur vorhandene Stahlbetonfertigteil. Die Schichtenfolge bleibt vergleichbar, jedoch erfolgt die Integration der Dämmung bereits werkseitig im Rahmen der Modulproduktion, wodurch ein hoher Vorfertigungsgrad und minimale Bauzeiten vor Ort ermöglicht werden. Diese strukturelle Parallelität zwischen Bestand und Modul sorgt nicht nur für Konsistenz im technischen Aufbau,

sondern erleichtert auch Montage, Rückbau und Wiederverwertung in einem späteren Lebenszyklus.

Im Bereich der Gründung erfolgt der thermische Abschluss zum Erdreich ebenfalls über hochverdichtete Strohplatten, die als lastabtragende und dämmende Komponente integriert werden. Darauf wird das modulare Bodensystem aufgesetzt, das sich durch eine einfache, schichtenweise Konstruktion auszeichnet: Beginnend mit einem Brettschichtholzelement als tragende Ebene folgen eine Trittschalldämmung, eine Spanplatte und ein abschließender Belag aus Linoleum, womit es sich um ein natürliches, CO_2-neutralen Material mit hoher Langlebigkeit und recyclingfreundlichen Eigenschaften handelt.

Auch im Bereich der Decken wird die bestehende Stahlbetonfertigteilstruktur durch eine hybride Lösung ergänzt, bei der oberseitig ein Brettschichtholzelement aufgebracht wird, das die Kontinuität zum modularen Aufbau der Aufstockung gewährleistet. In Bereichen, in denen keine Betonbauteile vorhanden sind, so etwa innerhalb der reinen Holzmodulstruktur, übernehmen Brettschichtholzelemente vollständig die tragende Funktion. Als abgehängte Decken kommen Systemlösungen von Lignotrend zum Einsatz, die für verschiedene akustische Anforderungen konfigurierbar sind. Diese Systeme bestehen aus Holz und Holzwerkstoffen mit optionaler Wiederverwendbarkeit und hoher baubiologischer Qualität.

An den horizontalen Schnittstellen zwischen den gestapelten Modulen schließen die unteren Module mit einer Moduldecke ab, deren Stärke und Lage sich an der ursprünglichen Betonstruktur orientiert, um ein durchgängiges statisches System zu gewährleisten. Darauf wird erneut der typische Bodenaufbau mit Brettschichtholz, Trittschalldämmung und Belag realisiert, wodurch sich eine homogene Aufbaulogik in allen Geschossen ergibt, die den modularen Anspruch des Systems unterstreicht.

Den oberen Abschluss bildet das Dachsystem, das eben-

falls als Brettschichtholzelement ausgebildet ist. Es bietet die erforderliche Tragfähigkeit für das darüber liegende Gründach, das nicht nur zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes beiträgt, sondern auch eine wichtige ökologische Funktion übernimmt. Durch den Verzicht auf konventionelle Abdichtungsmaterialien zugunsten natürlicher oder recycelter Baustoffe wird auch hier die Kreislauffähigkeit maximiert.

In Summe verfolgt die Konstruktion der Variante 3 einen konsequent zirkulären Ansatz, der sowohl auf statische Effizienz als auch auf Materialgerechtigkeit, Vorfertigung und Wiederverwendbarkeit setzt. Durch den differenzierten Einsatz von Reuse- und Recyclingmaterialien, verbunden mit einer modularen Logik und der Integration natürlicher Dämmstoffe, gelingt eine konstruktive Umsetzung, die den Anforderungen einer ressourcenschonenden und zukunftsfähigen Architektur in besonderem Maße entspricht.

Flächenverteilung

Die Flächenverteilung in Variante 3 zeichnet sich durch eine signifikante funktionale Neugewichtung und eine bewusste Abkehr vom klassischen Prinzip der kleinteiligen Unterrichtsorganisation aus. Besonders auffällig ist die Reduktion der Flächenanteile für Klassen- und Unterrichtsräume, die in dieser Variante lediglich 8 % bzw. 5 % der Gesamtfläche einnehmen. Diese vergleichsweise niedrigen Werte sind nicht als Defizit zu interpretieren, sondern spiegeln vielmehr einen didaktischen Paradigmenwechsel wider: Im Zentrum der räumlichen Konzeption stehen großzügige Open-Space-Bereiche, die als alternative Lernumgebungen konzipiert wurden. Sie bieten flexible Nutzungsoptionen für projektbasiertes Arbeiten, interdisziplinäre Gruppenarbeit sowie informelle Lernsettings und treten damit als funktionale und räumliche Entsprechung zur klassischen Klassenraumsituation auf.

In direkter Konsequenz dieses offenen Raumkonzepts erfährt der Gemeinschaftsflächenanteil eine deutliche Aufwertung: Mit 33 % der Gesamtfläche stellen diese Berei-

che nicht nur das größte Einzelkontingent dar, sondern sind als zentrales gestalterisches und pädagogisches Element zu verstehen. Die Gemeinschaftszonen übernehmen eine multifunktionale Rolle, denn sie dienen als Kommunikationsorte, Treffpunkte, Präsentationsflächen und Veranstaltungsräume zugleich. Diese Flächenentwicklung unterstützt das Ziel, soziale Interaktion, Durchlässigkeit zwischen den Nutzungseinheiten und eine stärkere Öffnung zur Nachbarschaft zu fördern.

Auch die Lehrenden profitieren von dieser Neuorganisation der Raumstruktur: Zwar machen Rückzugsbereiche für die Lehrerschaft lediglich 5 % der Gesamtfläche aus, doch wird dieser Wert durch den ebenfalls für sie geöffneten Open-Space-Bereich funktional erweitert. Dadurch entstehen Arbeitsumgebungen, die sowohl konzentriertes Arbeiten als auch kollaborativen Austausch ermöglichen. Diese Gestaltung steht im Einklang mit aktuellen pädagogischen Anforderungen an teamorientierte Lehrformate und interprofessionelle Zusammenarbeit.

Ein weiterer signifikant erhöhter Flächenanteil entfällt auf die Erschließungsflächen, die mit 33 % einen maximalen Wert erreichen. Dieser hohe Anteil lässt sich funktional begründen: Die Kombination aus unterschiedlichen Nutzungen von modularer Lernumgebung über gemeinschaftliche Veranstaltungsbereiche bis hin zu multifunktionalen Lehrflächen erfordert großzügige Ankommens- und Verteilzonen, die die Orientierung erleichtern und einen fließenden Übergang zwischen den Bereichen ermöglichen. Zugleich dienen diese Erschließungsbereiche auch selbst als qualifizierte Kommunikations- und Begegnungsräume, was ihre Mehrfachnutzung und Flächenrechtfertigung unterstreicht.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Variante 3 mit ihrer Flächenverteilung ein integratives Raumkonzept verfolgt, das die traditionellen Flächenhierarchien aufbricht und stattdessen Vielfalt, Flexibilität und gemeinschaftliches Lernen ins Zentrum rückt. Die räumliche Organisation unterstützt die angestrebte Transformation von Schule zu einem offenen, adaptiven Bildungsort, der

sowohl funktional als auch architektonisch auf zukunftsfähige Lehr- und Lernkonzepte reagiert.

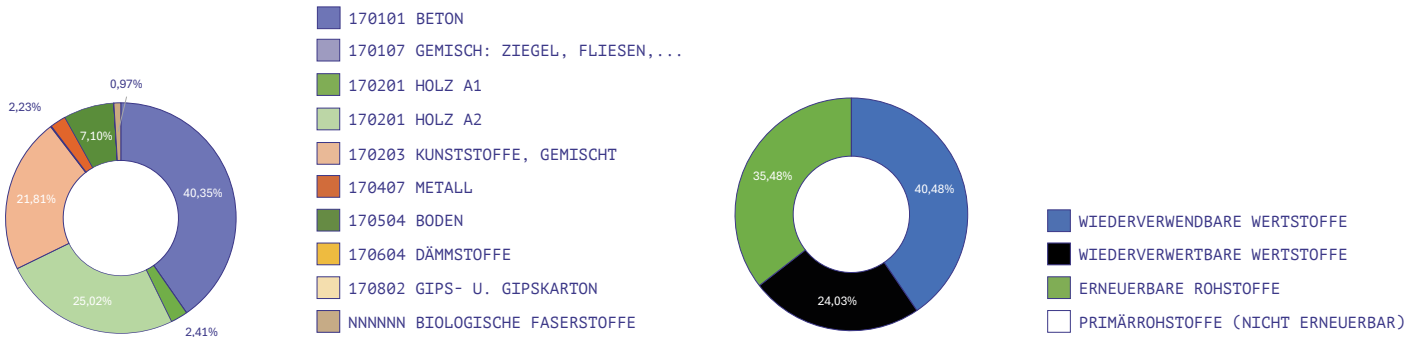
Massen

Die Materialmassenverteilung in Variante 3 offenbart eine signifikante strukturelle Verschiebung innerhalb der konstruktiven Gesamtbilanz, die in direktem Zusammenhang mit der großflächigen Ergänzung durch Holzbaumodule steht. Im Vergleich zur Ausgangsvariante zeigt sich eine markante Zunahme der Gesamtgebäudemasse um rund 30 %, wodurch die nun erfasste Bruttomasse auf 29.245,33 Tonnen ansteigt. Diese Zunahme ist vorrangig auf die Einbringung einer erheblichen Menge an Holzbaumaterialien zurückzuführen, insbesondere durch Brettschichtholzelemente in Decken-, Wand- und Dachkonstruktionen sowie linienhaft eingesetzte Reuse-Holzfassadenelemente.

Im Zuge dieser volumetrischen Ausweitung wird das bislang dominante Verhältnis der Betonmasse relativiert. Während Beton in den vorangegangenen Varianten stets als primärer Träger der Gebäudemasse auftrat, reduziert sich sein prozentualer Anteil in Variante 3 auf 40,35 %. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass Beton zwar weiterhin tragendes Grundelement im Bestandsbereich bleibt, jedoch durch die strategische Materialsubstitution in den Ergänzungsbauten keine zusätzliche Massedominanz entfaltet.

Gleichzeitig steigt der Anteil der Baustoffkategorie Holz A2, also verleimte, nicht naturbelassene Holzwerkstoffe, auf 25,02 % der gesamten Gebäudemasse. Diese Entwicklung reflektiert nicht nur die konsequente Orientierung hin zu nachwachsenden Rohstoffen, sondern auch das Ziel, den Einsatz von vorproduzierten und ressourcenschonenden Systemelementen zu maximieren. Die massive Präsenz des Holzes wirkt sich sowohl statisch-funktional als auch ökologisch-ökonomisch auf das Gesamtgebäude aus und stärkt die Zirkularitätspotenziale signifikant.

Im Bereich der verglasten Bauteile zeigt sich eine Fort-



Tab. 25:
Massen-Bilanz

setzung der Entwicklung aus Variante 2: Der Anteil von Glas an der Gesamtmasse beträgt weiterhin 21,81 % und bleibt damit konstant. Diese Stabilität verweist auf die identischen Fensteranteile im Fassadensystem, deren funktionale Einbindung nicht durch die modulare Struktur beeinträchtigt wird. Gleichzeitig ist sie Ausdruck der fortlaufend hohen Licht- und Transparenzanforderungen, die auch in der vertikalen Erweiterung beibehalten werden.

Weitere Materialkategorien wie Metall treten in Variante 3 auf 2,23 % deutlich zurück. Ihr Anteil beschränkt sich in erster Linie auf die abgehängten Decken, die modular mit Aluminiumlösungen umgesetzt wurden, was in der Gesamtmasse jedoch keinen dominanten Einfluss entfaltet. Die Gründachstruktur, die auf 7,10 % der Gesamtmasse veranschlagt wird, bleibt ähnlich wie schon in Variante 2 konstant. Sie reflektiert das Anliegen, auch in aufgestockten Bereichen die Dachflächen durch Begrünung klimagerecht und gestalterisch hochwertig auszugestalten.

Besonders hervorzuheben ist schließlich die Entwicklung im Bereich der Dämmstoffe. Klassische, synthetische oder mineralische Dämmmaterialien werden nahezu vollständig substituiert. Der Anteil dieser herkömmlichen Dämmstoffe sinkt in Variante 3 auf nahezu null. Stattdessen dominieren biologische Faserstoffe mit 0,97%, konkret Stroh, als Dämmmaterialien. Diese Umstellung ist nicht nur in Bezug auf die Materialbilanz bedeutsam, sondern sie verbessert auch die Kreislauffähigkeit und

reduziert gleichzeitig die stofflichen Entsorgungsaufwände im Post-Use-Szenario.

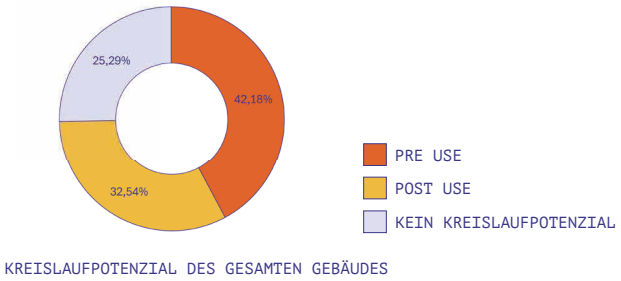
Insgesamt zeigt sich, dass Variante 3 eine neue Materiallogik etabliert, die die gebäudestrukturelle Logik des Bestandes mit einer massiv erhöhten Holzmasse in Einklang bringt. Die gewählte Kombination aus rezyklierbaren, biologischen und wiederverwendbaren Materialien wirkt sich positiv auf die stoffstromanalytische Bilanz aus und verdeutlicht den Anspruch, Konstruktion und Nachhaltigkeit konsequent in Einklang zu bringen.

Zirkularität

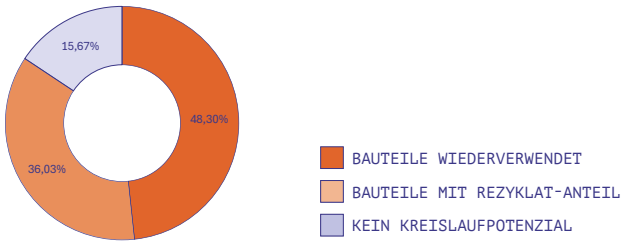
Die Zirkularitätsbewertung (CPX) der Variante 3 stellt mit einem Gesamtwert von 74,72 % den höchsten Zirkularitätsindex aller untersuchten Varianten dar und übertrifft somit selbst die bislang führende ReUse-orientierte Variante 1. Dieser Wert setzt sich zusammen aus einem PreUse-Anteil von 42,18 % und einem PostUse-Potenzial von 32,54 %, wobei insbesondere Letzteres innerhalb des Variantenvergleichs den besten Einzelwert im Rückbauszenario markiert.

Im PreUse-Bereich entfällt ein signifikanter Anteil von 48,30 % auf wiederverwendete Bauteile, während 36,03 % auf Bauteile mit Rezyklatanteil zurückgeführt werden können. Die Kombination aus hoher Wiederverwendungsrate und gezieltem Einsatz sekundärer Rohstoffe führt somit zu einem herausragenden Zirkularitätswert noch vor der eigentlichen Nutzungsphase des Gebäudes. Die bewusste Auswahl regional verfügbarer ReUse-Materialien etwa in Form der vorgestellten REUSE Holzfassadenelemente oder auch der modularen Deckensysteme trägt hier entscheidend zur Verbesserung des CPX bei, da sie nicht nur primäre Stoffströme ersetzen, sondern zugleich ressourcenschonende Herstellungsprozesse und kurze Transportwege implizieren.

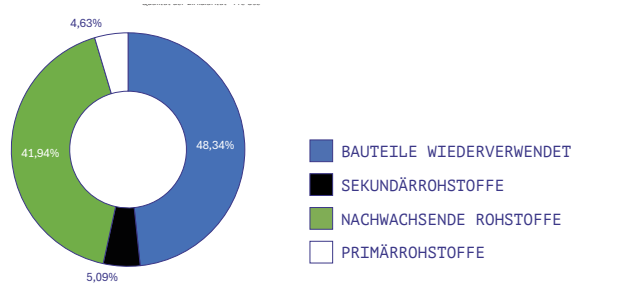
Der besonders hohe PostUse-Wert von 34,88 % resultiert maßgeblich aus der überproportionalen Masse an Holzbaustoffen, die in der vertikalen Aufstockung und Modularergänzung zum Einsatz kommen. Durch die Ver-



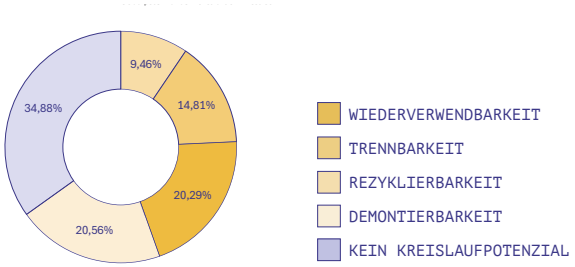
KREISLAUFPOTENZIAL DES GESAMTEN GEBÄUDES



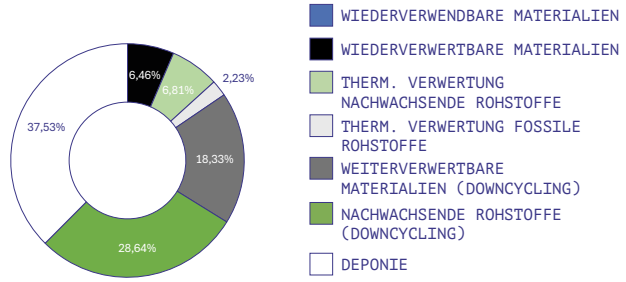
PRE USE - CPX



PRE USE - STOFFSTROM



POST USE - CPX



POST USE - STOFFSTROM

Tab. 26:
CPX-Bilanz

änderung der Verbindungsarten von monolithischen, betonierten Konstruktionen hin zu mechanisch lösbaren, geschraubten Verbindungen wird die Demontierbarkeit signifikant verbessert. Dies ist ein zentraler Hebel der Zirkularität: In Variante 2 wurde bereits mit losen Belagsschichten und trennbaren Aufbauten gearbeitet, jedoch ist es erst in Variante 3 die Materialmasse selbst, die diesen demontagefreundlichen Aufbau auch ökologisch stark ins Gewicht fallen lässt. Die CPX-Systematik zeigt hier deutlich, dass materielle Qualität nur in Kombination mit quantitativer Masse einen nachhaltigen Effekt im Rückbau entfalten kann.

Trotz dieses strukturellen Fortschritts bleibt jedoch der Einfluss des Bestandbetons spürbar. Die nicht demontierbaren oder schwer trennbaren Verbindungsschich-

ten, etwa im Altbestand, können nicht vollständig ausgeglichen werden. Sie wirken somit als Residualmasse mit begrenztem Kreislaufpotenzial, was verdeutlicht, dass eine vollständige Zirkularität nur über konsequente Materialtransformation möglich ist. Dennoch gelingt es Variante 3, diesen „Altlasten“ durch umfangreiche Substitution mit kreislauffähigen Massenteilen aus Holz erfolgreich entgegenzuwirken.

Besonders positiv zu bewerten ist die Rezyklierbarkeit des eingesetzten Holzes. Sowohl Vollholz- als auch Holzwerkstoffelemente erreichen potenziell Recyclingraten zwischen 75 und 100 %, abhängig von Sortenreinheit und Verarbeitungstiefe. In Verbindung mit der hohen Masseverfügbarkeit ergeben sich somit optimale Bedingungen zur stofflichen Wiederverwertung. Damit wird Variante 3 zu einem Best-Practice-Beispiel für den zirkulären Einsatz nachwachsender Rohstoffe in modularen Bauweisen.

Einschränkungen bestehen hingegen im Bereich der Trennbarkeit und Wiederverwendung. Die Verwendung von Brettschichtholzelementen, die hohe statische Leistungsfähigkeit mit standardisierten Querschnitten kombinieren, bringt konstruktive Herausforderungen für die Rückbaulogistik mit sich. Aufgrund ihrer individuellen Zuschnitte und der Verklebung sind diese Bauteile nur eingeschränkt sortenrein trennbar und kaum ohne professionelle Nachbearbeitung wiederverwendbar. Diese Einschränkungen führen dazu, dass der ReUse-Wert im PostUse-Bereich etwas gedämpft wird, obwohl der esamt-CPX dennoch den höchsten der Studie darstellt. Für tiefer gehende Einblicke gibt es weitere Tabellen mit Entscheidungskriteien der einzelnen Bauteile

Zusammenfassend verdeutlicht Variante 3, dass konstruktive Modularität, Materialwahl und Verbindungstechnik in ihrer Wechselwirkung den entscheidenden Einfluss auf den Zirkularitätsindex haben. Die gezielte Kombination aus vorgefertigten Holzmodulen, natürlichen Dämmstoffen, lösbaren Verbindungstechniken und einer integralen Planung über mehrere Nutzungsebenen hinweg

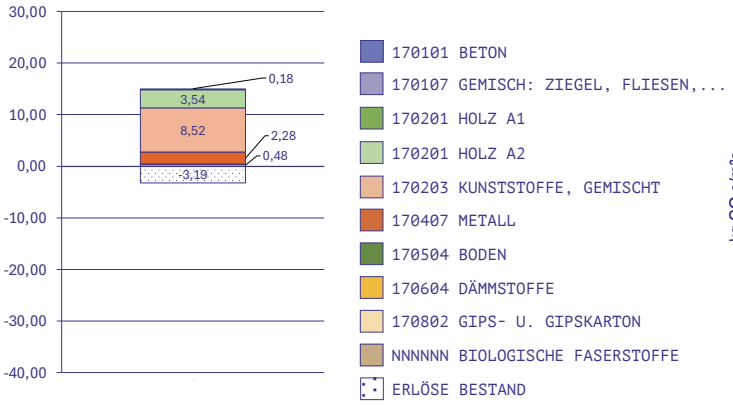
macht Variante 3 zu einem Leuchtturmprojekt zirkulären Bauens.

Treibhausgase

Die Treibhausgasbilanz der Variante 3 zeichnet sich durch eine ausgewogene Materialstrategie und den gezielten Einsatz emissionsarmer sowie recyclingfähiger Baustoffe aus. Insgesamt ergibt sich ein Global Warming Potential (GWP) von 14,99 kg CO_2e/m^2a, ein Wert, der das Ergebnis sowohl bewusster Materialwahl als auch der Integration von Bestandsstrukturen darstellt. Mit diesem Wert positioniert sich Variante 3 im unteren Mittelfeld der untersuchten Varianten, wobei auffällt, dass hier vor allem das Zusammenspiel von Bestandserhalt, Rezyklaten und nachwachsenden Rohstoffen zu einer signifikanten Einsparung führt.

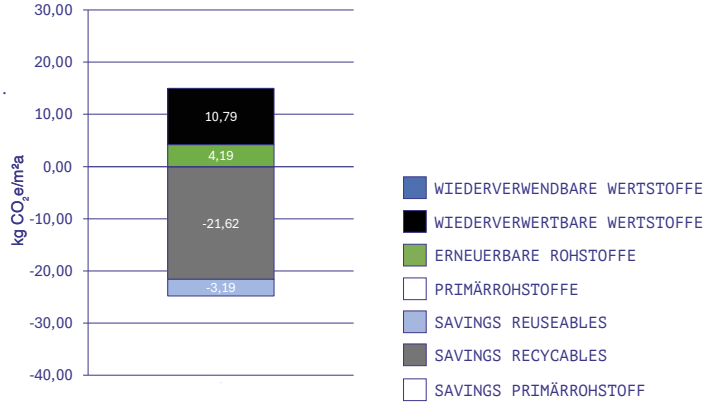
Ein wesentlicher Hebel zur Reduktion der Emissionen liegt in der Entscheidung für recyclingbasierte Fensterkonstruktionen, deren hohe Emissionsreduktion in der Stoffstromanalyse besonders deutlich wird: Allein durch diese Bauteile ergibt sich ein GWP-Einsparpotenzial von 21,62 kg CO_2e/m^2a. Die eingesetzten Fensterprofile basieren auf Sekundäraluminium und recyceltem Glas, wodurch sich gegenüber konventionellen Primärprodukten massive Reduktionen der produktspezifischen CO_2-Emissionen realisieren lassen. Während Aluminiumfensterrahmen aus Primärrohstoffen typischerweise einen CO_2-Fußabdruck von über 150 kg CO_2-eq/m^2 aufweisen, reduziert sich dieser durch Closed-Loop-Verfahren und Cullet-Zugabe bei der Glasherstellung um mehr als 60 %.

Demgegenüber ist jedoch festzuhalten, dass bei anderen Bauteilen keine weiteren empirisch fundierten Emissionswerte zu spezifischen Fertigungsbedingungen erhoben wurden. Da insbesondere für die werkgebundene Fertigung der modularen Holzbauelemente derzeit keine belastbaren CO_2-Werte vorliegen, wurden für diese Analyse konservativ die Standardwerte aus der Concular-Datenbank verwendet. Dadurch kann das tatsächliche Einsparpotenzial durch industrielle Vorfertigung und re-



GESAMT: 14,99 $kgCO_2e/m^2a$
ERLÖSE: -3,19 $kgCO_2e/m^2a$

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN



GESAMT: 14,99 $kgCO_2e/m^2a$
ERLÖSE: -24,81 $kgCO_2e/m^2a$

GWP NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	GWP total (kg CO_2e)/ m2	GWP total (kg CO_2e)/m2*a
170101 Beton	0,00	0
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0
170201 Holz A1	8,96	0,179183518
170201 Holz A2	176,86	3,537136005
170203 Kunststoffe, gemischt	0,00	0
170407 Metall	113,76	2,275170465
170604 Dämmstoffe	0,01	0,000185715
170802 Gips- u. Gipskarton	0,03	0,000529741
170904 Baumischabfall	0,00	0
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	23,86	0,477185149
170202 Glas	425,86	8,517206222
170504 Boden	0,00	0
Erlöse Bestand	-159,50	-3,18994513
Gesamt		11,80

GWP NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	10,79
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	4,19
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-3,19
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-21,62
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

GWP NACH STOFFSTROM

Tab. 27:
GWP-Bilanz

gionale Wertschöpfung zwar vermutet, aber nicht exakt beziffert werden. Die Emissionen der Bauteile spiegeln daher einen eher zurückhaltenden Schätzwert wider, der in einer vertieften Bilanzierung noch präzisiert werden müsste.

Trotz dieser Einschränkung zeigen sich die Holzwerkstoffe als überaus klimaschonende Bauteilgruppe: Mit einem spezifischen GWP von nur 4,19 kg CO_2e/m^2a stellt sich der Beitrag des verbauten Holzes als besonders gering heraus insbesondere im Vergleich zum Glas, dessen Massenanteil lediglich rund 3 % über dem des Holzes

liegt, jedoch ein etwa 60 % höheres Emissionsprofil aufweist, selbst bei Einsatz von Recyclingglas. Diese Diskrepanz verweist deutlich auf das hohe Klimaschutzpotenzial nachwachsender Rohstoffe, gerade wenn diese wie hier in großem Maßstab verbaut und zugleich stofflich hochwertig eingebunden werden.

Ein weiterer bedeutender Beitrag zur Emissionsminderung ergibt sich aus dem Erhalt der Bestandsstruktur, insbesondere der Stahlbetonbauteile. Die komplette Weiterverwendung der tragenden Bestandselemente trägt zur CO_2-Gutschrift in Höhe von etwa 3,19 kg CO_2e/m^2a bei. Dieser Wert resultiert aus der nicht notwendigen Neuherstellung energieintensiver Betonbauteile, was angesichts der mit Abstand höchsten Emissionsintensität von Primärbeton einen substantiellen Effekt auf die Gesamtemissionen darstellt.

Auch in der Stoffstromanalyse spiegeln sich diese Einsparungen klar wider: Die Fenster sind als anteilige Sekundärrohstoffe erfasst und schlagen dort positiv zu Buche. Darüber hinaus treten auch die nachwachsenden Rohstoffe vor allem in Form von Stroh- und Holzfaserdämmung sowie Massivholz mit einem GWP-Anteil von insgesamt 4,19 kg CO_2e/m^2a deutlich in Erscheinung. Dabei handelt es sich um eine bemerkenswerte Konstellation: Während nachwachsende Baustoffe typischerweise aufgrund ihrer niedrigen Emissionswerte ohnehin als vorteilhaft gelten, werden sie in dieser Variante durch ihre hohe Masseanteilhaftigkeit zusätzlich wirksam und was dem Grundprinzip der emissionsorientierten Massenbilanzierung in besonderer Weise entspricht.

In der Gesamtschau offenbart Variante 3 somit ein differenziertes, aber stringentes Klimabilanzprofil. Die Kombination aus Bestandsintegration, Verwendung von ReUse-Komponenten, gezieltem Einsatz von Sekundärrohstoffen und einem hohen Anteil an nachwachsenden Materialien ermöglicht eine klare Reduktion der THG-Emissionen, obwohl die Gesamtkubatur des Gebäudes im Vergleich zu anderen Varianten erweitert wurde. Zukünftige Bewertungen könnten bei vertiefter Datenlage,

was insbesondere Prozesse der modularen Vorfertigung betrifft, sogar noch zusätzliche Einsparpotenziale offenlegen.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Variante 3 ergibt ein differenziertes, aber insgesamt vergleichsweise günstiges Bild im Kontext der Verwertungskosten. Obwohl sich die Gesamtmasse des Gebäudes gegenüber den anderen Varianten deutlich erhöht hat und vor allem bedingt durch den massiven Einsatz von Holz als Hauptkonstruktionsmaterial wird, führt dieser Materialwechsel nicht zu einem Anstieg, sondern im Gegenteil zu einer leichten Senkung der verwertungsbezogenen Kostenbelastung.

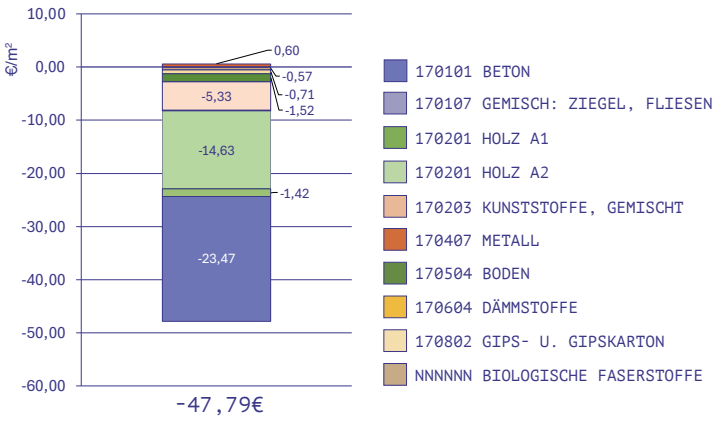
Konkret belaufen sich die Verwertungskosten dieser Variante auf 47,79 €/m², was im Vergleich zu Variante 2 den zweit niedrigsten Wert aller untersuchten Varianten darstellt, auch wenn der Unterschied nur marginal ist. Dieser vergleichsweise günstige Wert ist umso bemerkenswerter, da Holz insbesondere in seiner Werkstoffform mit einem Verwertungskostenansatz von rund 72 €/t zu Buche schlägt. Diese negative Kostenbewertung ist auf die geringe Wiederverwertungsfähigkeit von verklebtem oder stark bearbeitetem Holz zurückzuführen, wie sie beispielsweise bei Brettschichtholzelementen oder formaldehydhaltigen Holzwerkstoffen vorkommen kann. Da diese aber dennoch in großen Massen verbaut wurden, vergrößert sich der verwertungsrelevante Materialanteil. Dennoch können durch gezielte Wahl biologischer Dämmstoffe wie Stroh sowie durch das Vermeiden mineralischer oder metallischer Massenträger wirtschaftliche Kompensationen erzielt werden.

Ein erheblicher Einzelposten innerhalb der Kostenstruktur sind die eingesetzten Folienmaterialien, insbesondere die dampf- oder windbremsenden Kunststoffschichten, die mit 5,33 €/m² einen spürbaren Beitrag zu den Gesamtverwertungskosten leisten. Diese Folien sind konstruktiv zwar notwendig, aber durch ihre stoffliche Zusammensetzung und die häufige Kombination mit anderen Materialien schwer trenn- und damit nur eingeschränkt

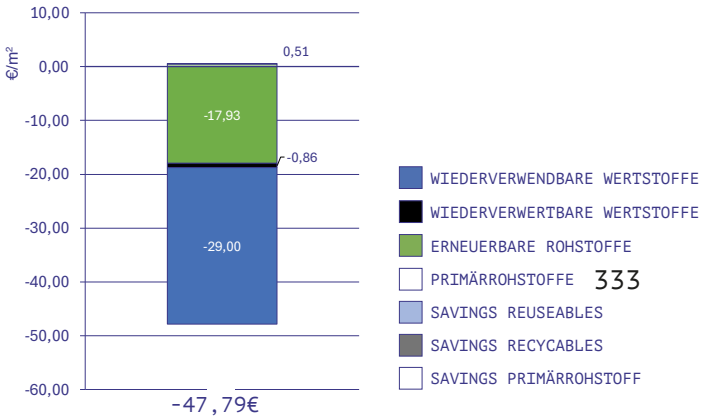
Tab. 28:
Kosten-Bilanz

Bauteil	Baukosten (€/gesamt)	Rückbau (€)	Entsorgung (€)	Rückbau- und Entsorgungskosten Rückbau nach 50 Jahren (€/gesamt)	Gesamt (€/gesamt)
Außenwand Beton	363.923,84 €	345.829,66 €	45.921,85 €	391.751,51 €	755.675,35 €
Außenwand Holz	1.660.805,36 €	477.570,64 €	53.492,24 €	531.062,88 €	2.191.868,24 €
Bodenplatte	1.969.600,25 €	1.040.755,51 €	159.821,43 €	1.200.576,94 €	3.170.177,19 €
Decken Beton	2.047.109,37 €	2.177.818,16 €	152.044,63 €	2.329.862,79 €	4.376.972,16 €
Decken Holz	6.087.707,82 €	1.502.058,51 €	187.178,95 €	1.689.237,46 €	7.776.945,28 €
Dach	3.077.206,97 €	1.156.746,95 €	106.128,04 €	1.262.874,99 €	4.340.081,96 €

GESAMTKOSTEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN



VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

Entsorgungskategorie	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
170101 Beton	-23,47
170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00
170201 Holz A1	-1,42
170201 Holz A2	-14,63
170203 Kunststoffe, gemischt	-5,33
170407 Metall	0,60
170604 Dämmstoffe	0,00
170802 Gips- u. Gipskarton	-0,71
170904 Baumischabfall	0,00
nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	-0,57
170202 Glas	-0,14
170504 Boden	-1,52
170302 Bitumengemische	0,00
Gesamt	-47,79

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH ABFALLKATEGORIEN

Stoffstrom	Verwertungskosten und -Erlöse (€/m2)
wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	-28,919904
wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	-0,85632879
Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	-17,9327493
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	0,09
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,51
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Savings Primärrohstoff	0,00

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE NACH STOFFSTROM

recycelbar, was sich negativ in der Entsorgungsbilanz niederschlägt.

Im Rahmen der Stoffstromanalyse bestätigen sich die Ergebnisse der Massen- und Materialbewertung: Der größte Einfluss auf die Kosten wird durch die ReUse-Komponenten erzeugt. Diese weisen zwar Vorteile hinsichtlich der Zirkularität und THG-Bilanz auf, erfordern aber oft aufwändige Rückbau-, Trenn- oder Aufbereitungsprozesse, die mit erhöhten Verwertungskosten verbunden sind. Das gilt besonders für Materialien, die durch frühere Nutzung mechanisch oder chemisch vorbelastet sind. ReUse-Holz ist hier ein gutes Beispiel, da es häufig nicht sortenrein rückbaubar ist und nur unter bestimmten Bedingungen wiederverwendet werden kann.

Gleichzeitig fällt in dieser Variante der hohe Anteil an nachwachsenden Rohstoffen positiv ins Gewicht. Diese umfassen sowohl die Haupttragstruktur aus Holzwerkstoffen als auch nachhaltige Dämmstoffe wie Stroh. Diese Materialien sind nicht nur ökologisch vorteilhaft, sondern verursachen auch deutlich geringere Entsorgungskosten als mineralische oder synthetische Baustoffe. Ihre einfache Rückbaubarkeit, biologische Abbaubarkeit oder energetische Verwertbarkeit trägt wesentlich zur ökonomischen Entlastung bei.

Insgesamt zeigt sich, dass die Variante 3 zwar keine signifikanten Erlöse durch wiederverwertbare Metalle generieren kann, wie dies etwa bei Variante 1 durch die Aluminiumfassade der Fall war, aber dennoch durch eine materialökologisch ausgewogene Planung zu einem ökonomisch robusten Ergebnis kommt. Der Fokus auf nachwachsende, regional verfügbare Materialien mit günstigen Entsorgungsperspektiven stellt einen zukunftsweisenden Ansatz für die Verbindung von Zirkularität und Kostenkontrolle im Gebäuderückbau dar.

Insgesamt belaufen sich die Gesamtkosten auf 22.611.719,99€.

Foto: Eigenes

6 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die vergleichende Auswertung der entwickelten Entwurfsvarianten zeigt, wie unterschiedlich sich Strategien zur Transformation eines Bestandsgebäudes hinsichtlich Kreislauffähigkeit, Ressourceneinsatz und Nutzungsqualität auswirken. In der Diskussion werden die Ergebnisse systematisch gegenübergestellt, kritisch reflektiert und auf ihre Übertragbarkeit geprüft. Dabei werden sowohl gestalterische und technische als auch wirtschaftliche und soziale Aspekte berücksichtigt. Aufbauend auf den Erkenntnissen werden konkrete Handlungsempfehlungen formuliert, die adaptive und zirkuläre Prinzipien in zukünftige Planungsprozesse integrierbar machen. Der Ausblick skizziert mögliche Perspektiven für Forschung und Praxis im Bereich des nachhaltigen Bauens im Bestand.

6.1 Take-aways der vier Varianten im Vergleich: Bewertung der entwickelten Konzepte und deren Übertragbarkeit

Die vier im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Varianten zur Transformation des Felix-Fechenbach-Berufskollegs ermöglichen eine differenzierte Analyse des bestehenden Gebäudes in Bezug auf Flächennutzung, Materialeinsatz, Zirkularität, ökologische Wirkung sowie ökonomische Konsequenzen. Ziel war es, die Leistungsfähigkeit jeder Variante auf diesen Ebenen sichtbar zu machen und ihre Übertragbarkeit auf vergleichbare Planungsaufgaben zu bewerten. Dabei fungiert Variante 0 als Referenzwert. Sie bildet den aktuellen Bestand ohne Eingriffe ab und dient nicht als gestalterisches oder ökologisches Ideal, sondern als Ausgangspunkt zur Bewertung der Entwicklungspotenziale.

Flächenverteilung: funktionale Reorganisation und räumliche Qualität

Die untersuchten Varianten unterscheiden sich erheblich in der Anordnung und Gewichtung ihrer Flächenbereiche. Variante 1 bleibt in ihrer Struktur weitgehend nah am bestehenden Layout. Die funktionale Organisation des Gebäudes wird beibehalten, mit nur geringen Anpassungen hinsichtlich des Verhältnisses von Unterrichts- zu Gemeinschaftsflächen. In Variante 2 wird durch gezielte Eingriffe in die Gebäudemasse eine räumliche Neugliederung vorgenommen, die insbesondere die Außenräume aufwertet. Innenräumlich wird eine größere Flexibilität geschaffen, die sich an zukünftige Nutzungsformen anpassen lässt.

Variante 3 entwickelt diesen Ansatz weiter. Sie löst die klassische Trennung in Klassenräume und Flurzonen zugunsten einer offenen Raumstruktur auf. Es entsteht eine Architektur des offenen Lernens, bei der über 30 Prozent der Fläche multifunktional und gemeinschaftlich genutzt werden können. Diese Strategie ist nicht nur ein funktionaler Eingriff, sondern auch ein bildungspolitisches Statement. Schule wird als Ort sozialer Interaktion

und informellen Lernens verstanden, was sich räumlich unmittelbar abbildet.

Im Vergleich zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen räumlicher Offenheit und pädagogischer Flexibilität. Gleichzeitig erhöht sich mit wachsender Offenheit der Anteil an Flächen, die nicht primär für Unterricht genutzt werden, sondern der Erschließung und dem Aufenthalt dienen. Dies weist auf eine veränderte Definition schulischer Räume hin, die über reine Vermittlungsräume hinausgehen.

Materialeinsatz: Substitution, Diversifizierung und struktureller Wandel
Auch im Hinblick auf die verwendeten Materialien zeigen die Varianten unterschiedliche Strategien. Variante 1 setzt auf selektive Wiederverwendung vorhandener Bauteile. Die Materialbilanz verändert sich dabei nur geringfügig. Die Masse bleibt in ihrer Zusammensetzung weitgehend erhalten, was auf eine konservative Transformationsstrategie verweist.

Variante 2 verfolgt eine gezielte Reduktion der Masse durch Rückbau einzelner Gebäudeteile. Gleichzeitig erfolgt eine Substitution schwerer, energieintensiver Materialien wie Beton durch leichtere, zirkulär besser bewertbare Alternativen. Zum Einsatz kommen hier unter anderem ReZiegel, Hanfdämmstoffe und Reaporplatten. Variante 3 zeigt ein anderes Bild: Die Aufstockung führt zu einer Erhöhung der Gesamtmasse um etwa 30 Prozent. Diese Massezunahme ist jedoch nicht als negativ zu werten, da sie mit einer signifikanten Verbesserung der Materialqualität einhergeht. Der Anteil an Holzwerkstoffen und biologischen Dämmstoffen steigt auf über 25 Prozent, während der Anteil an Beton auf unter 40 Prozent sinkt.

Die Entwicklung zeigt, dass Masse allein kein aussagekräftiges Kriterium für Nachhaltigkeit ist. Entscheidend ist die stoffliche Zusammensetzung, das Rückbaupotenzial und die Wiederverwendbarkeit der eingesetzten Materialien.

Zirkularität: CPX als Bewertungsmaßstab

Die Zirkularitätsanalyse über den Concular Performance Index (CPX) macht die Unterschiede in der strategischen Ausrichtung der Varianten deutlich. Variante 1 erreicht mit einem CPX-Wert von über 72 Prozent den höchsten Anteil an Wiederverwendung im PreUse-Bereich. Variante 2 liegt mit einem ähnlichen Gesamtwert knapp darunter, wobei die Balance zwischen Reuse und Recycling auffällt. Variante 3 erreicht mit 74,71 Prozent den besten Gesamtwert. Ausschlaggebend dafür ist die konstruktive Gestaltung modularer, demontierbarer Bauelemente, die vor allem im PostUse-Bereich Wirkung entfalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass Zirkularität auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden kann. Variante 1 optimiert die Wiederverwendung vorhandener Materialien. Variante 2 zielt auf Recyclingfähigkeit und Materialsubstitution. Variante 3 kombiniert beide Ansätze mit dem zusätzlichen Fokus auf Demontierbarkeit. Konzeptionelle Grundlagen wie lösbare Verbindungen, sortenreine Materialtrennung und modulare Bauweisen wirken sich hier unmittelbar auf die zirkuläre Gesamtbilanz aus.

Treibhausgasemissionen: Einsparungen durch Materialsubstitution und Kreislaufstrategien

Die Bewertung der Varianten nach dem Global Warming Potential (GWP) zeigt deutliche Unterschiede in den Emissionen. Variante 2 erzielt mit 7,03 Kilogramm CO_2-Äquivalent pro Quadratmeter und Jahr den niedrigsten Wert. Erreicht wird dieser durch umfassende Materialsubstitution, unter anderem bei Fensterrahmen, Dämmstoffen und Estrichen. Variante 1 reduziert die Emissionen nur geringfügig, was auf die begrenzte Veränderung der Materialzusammensetzung zurückzuführen ist. Variante 3 bleibt mit 11,8 Kilogramm CO_2-Äquivalent pro Quadratmeter zwar über dem Wert von Variante 2, weist jedoch eine im Verhältnis zur Masse sehr effiziente Bilanz auf. Verantwortlich dafür ist die Nutzung emissionsarmer Materialien wie Holz und recyceltes Aluminium.

Variante 0 bildet mit knapp 30 Kilogramm CO_2-Äquivalent pro Quadratmeter den höchsten Emissionswert. Dies

unterstreicht, dass selbst geringfügige Eingriffe in Materialstruktur und Bauteilauswahl deutliche Einsparungen bewirken können. Transformation im Sinne der Kreislaufwirtschaft hat demnach nicht nur gestalterische, sondern vor allem klimapolitische Relevanz.

Wirtschaftlichkeit: Rückbaukosten und Materialwahl
Die wirtschaftliche Bewertung konzentriert sich auf die Rückbaukosten pro Quadratmeter, da diese eine zentrale Rolle für die langfristige Planbarkeit zirkulärer Architektur spielen. Variante 1 weist mit 53,67 Euro pro Quadratmeter die höchsten Entsorgungskosten auf. Grund dafür sind der hohe Betonanteil und der Einsatz von kostenintensiven Kunststoffen wie Fassadenfolien. Variante 2 senkt diese Kosten durch den Einsatz recyclingfähiger Materialien. Variante 3 erzielt mit 47,71 Euro pro Quadratmeter den besten Wert. Hier wirken sich insbesondere natürliche Dämmstoffe wie Hanf oder Stroh positiv auf die Kosten aus. Gleichzeitig entfallen aufwendige Entsorgungsprozesse für metallische oder kunststoffbasierte Verbundstoffe.

Auch Variante 0 ist mit 46,59 Euro pro Quadratmeter nicht kostenneutral. Es zeigt sich, dass eine strategische Materialwahl sowohl ökologisch als auch ökonomisch vorteilhaft sein kann – insbesondere dann, wenn Materialien bereits in der Planungsphase auf Rückbau und Wiederverwendung ausgerichtet werden.

Gesamtbewertung und Übertragbarkeit
Variante 1 verfolgt einen konservativen, aber nachvollziehbaren Weg der Bestandssicherung durch Wiederverwendung. Sie ist besonders dort geeignet, wo geringe Eingriffe gewünscht sind. Variante 2 überzeugt durch systematische Reduktion, konsequente Recyclingstrategien und eine ausgeglichene ökologische Bilanz. Variante 3 bietet die umfassendste Transformation. Sie kombiniert gestalterische, ökologische und konstruktive Innovationen und ist damit besonders relevant für eine zukunftsfähige, lernfördernde und zirkuläre Architektur.

Die Gegenüberstellung der Varianten verdeutlicht, dass

Transformation im Bestand nicht als lineare Entscheidung, sondern als gestalterisches und strategisches Abwägen unterschiedlicher Zielsetzungen verstanden werden muss. Die entwickelten Konzepte lassen sich nicht eins zu eins übertragen, bieten jedoch übertragbare Prinzipien, die in unterschiedlichen Kontexten Anwendung finden können – von der Materialwahl über die Raumgestaltung bis hin zur strategischen Steuerung von Rückbaukosten und Klimawirkung.

6.2 Handlungsempfehlungen für zirkuläres Bauen im Bestand

Aus der vergleichenden Bewertung der vier untersuchten Transformationsvarianten lassen sich fünf zentrale Handlungsfelder ableiten, die als strategische Leitlinien für Planungsprozesse im Bestand unter den Zielsetzungen der Kreislaufwirtschaft, CO_2-Reduktion und Ressourcenschonung dienen können.

Weiterbauen statt Neubau: Bestandserhalt als Priorität

Die Analyse verdeutlicht, dass ein verantwortungsvoller Umgang mit dem Bestand erhebliche ökologische Vorteile bietet. Die Strategie, bestehende Strukturen möglichst weitgehend zu erhalten und punktuell zu adaptieren, wie sie in Variante 1 umgesetzt wurde, weist ein hohes Einsparpotenzial bei Treibhausgasemissionen auf. Gleichzeitig verringert sich der Verbrauch von Primärrohstoffen durch die direkte Wiederverwendung vorhandener Bauteile und durch die Reduktion materialintensiver Eingriffe, insbesondere im Bereich tragender Strukturen. Auch bei Teilrückbauten, wie in Variante 2, oder bei strukturellen Ergänzungen, wie in Variante 3, ist eine ökologische Kompensation erforderlich. Diese kann durch den gezielten Einsatz kreislauffähiger, wiederverwendbarer oder nachwachsender Materialien erreicht werden. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Notwendigkeit, den Bestandserhalt in baurechtlicher, planerischer und förderpolitischer Hinsicht aufzuwerten und systematisch zu fördern, auch wenn dies in gestalterischer Hinsicht Ein-

schränkungen mit sich bringen kann.

Materialbewertung als Steuerungsinstrument in frühen Planungsphasen

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht allein der Grad der Bestandsintegration, sondern vor allem die stoffliche Qualität der eingesetzten Materialien über die ökologische Gesamtwirkung eines Umnutzungskonzepts entscheidet. Die Analyse von Variante 2 macht deutlich, dass Baustoffe mit hohem Rezyklatanteil und hoher Rückführbarkeit, wie die ReZiegel, Reaporplatten oder Hanffaserdämmung, zu signifikanten Verbesserungen der CO_2-Bilanz und der Zirkularität führen. Daraus lässt sich die Empfehlung ableiten, Materialentscheidungen nicht auf Basis von Verfügbarkeit oder Gewohnheit zu treffen, sondern auf Grundlage einer systematischen Bewertung von Stoffströmen. Eine solche Bewertung sollte bereits in frühen Planungsphasen erfolgen, idealerweise gestützt durch ein digital gestütztes Stoffstrommapping. So können Rückführungspotenziale, Entsorgungskosten und Recyclingpfade bereits im Entwurf mitgedacht werden.

Zirkularität quantitativ und qualitativ bewerten: Der CPX-Wert als Steuerungsgröße

Der CPX-Wert hat sich in der Analyse als verlässlicher Indikator zur Bewertung der Zirkularität eines Gebäudes erwiesen. Insbesondere Variante 3 erreicht mit einem Wert von 74,71 Prozent ein hohes Maß an Rückführbarkeit, vor allem durch eine modulare, mechanisch lösbare Konstruktionsweise. Die Verwendung von Schraubverbindungen anstelle geklebter Bauteile, sortenrein verlegte Beläge und eine demontierbare Tragstruktur ermöglichen eine hochwertige Rückführung nach der Nutzung. Dennoch zeigt die Analyse auch, dass hohe CPX-Werte nicht automatisch eine hochwertige stoffliche Wiederverwertung garantieren. Entscheidend ist daher die Ergänzung des CPX durch qualitative Stoffstromdaten, die Aussagen über Rückführungsquoten, Aufbereitungsbedarf und tatsächliche Recyclingprozesse erlauben. Die Empfehlung lautet daher, quantitative und qualitative Bewertungsansätze zu kombinieren, um eine belastbare Entscheidungsgrundlage für Planung und Materialwahl

zu schaffen.

CO_2-Bilanzierung mit Fokus auf Materialherkunft und Sekundäranteile

Die Bewertung der Treibhausgasemissionen der Varianten macht deutlich, dass substanzielle Reduktionen vor allem durch den Einsatz emissionsarmer Materialien mit hohem Sekundäranteil erreicht werden. Die besonders niedrige CO_2-Bilanz von Variante 2 mit einem Wert von 7,03 Kilogramm CO_2-Äquivalent pro Quadratmeter und Jahr unterstreicht dies. Besonders effektiv wirken sich Materialien wie Recyclingaluminium, Gipsfaserplatten mit Rücknahmesystem oder altglasbasierte Dämmstoffe aus. Dabei zeigt sich, dass die größten Reduktionspotenziale in den Lebenszyklusphasen der Materialherstellung liegen. Eine fundierte Bewertung dieser Werte setzt voraus, dass Planerinnen und Planer über verlässliche Angaben zu Sekundäranteilen und Herkunft der eingesetzten Baustoffe verfügen. Förderinstrumente und Nachweisverfahren sollten diese Informationen verpflichtend einfordern und als Grundlage für eine förderpolitische Steuerung verwenden.

Wirtschaftlichkeit differenziert nach Stoffgruppen betrachten

Die ökonomische Bewertung der Varianten zeigt, dass eine differenzierte Betrachtung von Rückbau- und Entsorgungskosten wesentlich ist. Auch wenn bestimmte Baustoffe wie Holz hohe Verwertungskosten verursachen, können sie durch niedrige Entsorgungskosten biologischer Materialien und stoffliche Erlöse aus Glas oder Metallen teilweise kompensiert werden. Die Analyse von Variante 3 zeigt, dass zirkuläre Bauweisen nicht zwangsläufig mit höheren Kosten verbunden sind. Im Gegenteil, durch gezielte Materialwahl und Verzicht auf kostenintensive Verbundstoffe lassen sich langfristige Entsorgungskosten deutlich reduzieren. Eine umfassende lebenszyklusbasierte Kostenbewertung sollte daher Rückbaukosten, Verwertungserlöse und Materialsubstitution gleichwertig berücksichtigen. Auf diese Weise kann die Wirtschaftlichkeit zirkulärer Strategien realistisch eingeschätzt und mit herkömmlichen Bauweisen

verglichen werden.

Materialmassen differenziert bewerten: Quantität und Qualität zusammendenken

Ein zentrales Ergebnis der Variantenanalyse besteht in der Erkenntnis, dass nicht nur die stoffliche Qualität, sondern auch die Menge der eingesetzten Materialien einen maßgeblichen Einfluss auf die ökologische und zirkuläre Bewertung eines Umnutzungskonzepts ausübt. In diesem Zusammenhang lassen sich zwei grundlegende Beobachtungen formulieren. Zum einen zeigt sich, dass der Erhalt möglichst großer Anteile der vorhandenen Gebäudemasse im Bestand ein entscheidender Vorteil darstellt. Dieser wirkt sich insbesondere im sogenannten PreUse-Bereich aus, da durch die direkte Weiterverwendung bestehender Bauteile sowohl der Einsatz neuer Rohstoffe vermieden als auch der Energieaufwand für Rückbau und Neubeschaffung minimiert werden kann. Die Ressourcenschonung ergibt sich dabei nicht nur aus der Materialkonservierung, sondern auch aus dem Erhalt von bereits investierter grauer Energie in Konstruktionen, Fundamenten und Hüllen.

Zum anderen wird deutlich, dass zusätzliche Masse – sofern sie aus trennbaren, demontierbaren und stofflich rückführbaren Materialien besteht – einen wirksamen Beitrag zur langfristigen Kreislauffähigkeit eines Gebäudes leisten kann. Dies lässt sich insbesondere an der in Variante 3 umgesetzten Aufstockung ablesen, die zu einer Erhöhung der Gesamtmasse führt, zugleich aber konsequent auf biobasierte und sekundär nutzbare Baustoffe setzt. Durch die Verwendung von modularen Holzkonstruktionen, natürlichen Dämmstoffen und mechanisch lösbaren Verbindungen entsteht ein hoher Rückbauwert, der die ökologische Bilanz langfristig positiv beeinflusst. Die spezifische Emissionsintensität pro eingesetzter Tonne Material bleibt dabei vergleichsweise niedrig, auch wenn der Anstieg der Gesamtmasse die Treibhausgasbilanz temporär erhöht.

Vor diesem Hintergrund muss der zusätzliche Einsatz von Masse kritisch betrachtet werden. Eine pauschale

Bewertung zusätzlicher Masse als nachhaltig ist nicht zielführend, da jeder Materialeinsatz Energieaufwand und Emissionen im Herstellungsprozess verursacht. Die ökologische Bewertung muss daher das Verhältnis zwischen der zusätzlichen Masse und ihrem Potenzial zur stofflichen Rückführung, Wiederverwendung und Entsorgung differenziert berücksichtigen. Insbesondere bei schwer trennbaren oder nicht rezyklierbaren Materialien besteht das Risiko, dass die geplante Zirkularität in der Umsetzung nicht erreicht wird und die ökologische Last stattdessen steigt.

Gleichzeitig wird deutlich, dass zusätzliche Masse nicht per se zu vermeiden ist, sofern sie funktional begründet und konstruktiv zukunftsfähig ausgestaltet ist. Wird beispielsweise durch den Zubau zusätzlicher Flächen ein pädagogisch-gestalterischer Mehrwert erzeugt, der langfristig nutzbar bleibt und mit qualitativ hochwertigen Materialien realisiert wird, kann der Anstieg der Masse gerechtfertigt sein. Die entscheidende Voraussetzung ist jedoch, dass diese neuen Bauteile bereits im Entwurf konsequent auf Rückführung, Demontage und Wiederverwertbarkeit ausgelegt sind. Nur so lässt sich die ökologische Wirkung über den gesamten Lebenszyklus hinweg kontrollieren und positiv beeinflussen.

In Bezug auf die Bestandsmasse lässt sich festhalten, dass der vollständige Erhalt bestehender Strukturen nicht nur aus gestalterischer, sondern auch aus ökologischer Perspektive ein prioritäres Ziel darstellen sollte. Die Bewertung des PreUse-Anteils zeigt, dass jeder erhaltene Quadratmeter Baustruktur einen direkten Beitrag zur Ressourcenschonung und Emissionsvermeidung leisten kann. Dies gilt insbesondere in Fällen, in denen Schadstofffreiheit, konstruktive Eignung und räumliche Adaptionsfähigkeit gegeben sind. In der planerischen Praxis sollte daher angestrebt werden, die Bestandsmasse so weit wie möglich in die zukünftige Nutzung zu integrieren. Ergänzende Eingriffe sind nur dort vorzunehmen, wo funktionale, technische oder nutzungsbezogene Erfordernisse dies zwingend erforderlich machen und durch zirkuläre Materialstrategien kompensiert werden

können.

Eine übergeordnete Handlungsempfehlung besteht darin, sowohl Erhalt als auch Erweiterung konsequent mit Stoffstrombewertungen, Lebenszyklusanalysen und Rückbauprognosen zu unterlegen. Diese integrierten Bewertungsansätze ermöglichen es, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Materialmenge, Zirkularität, Emissionen und Kosten nachvollziehbar zu machen und auf dieser Grundlage fundierte Entscheidungen für zukunftsfähige Entwurfskonzepte im Bestand zu treffen.

Ausblick: Entwicklung einer Umnutzungsmatrix als Planungsinstrument

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit ergibt sich die Möglichkeit, eine Umnutzungsmatrix zu entwickeln, die als strategisches Entwurfsinstrument für frühe Planungsphasen eingesetzt werden kann. Eine solche Matrix kann unterschiedliche Stoßrichtungen der Planung systematisch abbilden. Dazu zählen beispielsweise Bestandserhalt, Emissionsminderung oder Rückbaufähigkeit. Diese können wiederum mit konkreten Planungskriterien wie maximalen CO_2-Werten, Primärrohstoffanteilen, Konstruktionsprinzipien oder Fassadenöffnungsgraden verknüpft werden. Die Anwendung kann sowohl im städtebaulichen Kontext als auch auf der Ebene des Hochbaus erfolgen. Langfristig ließe sich die Matrix mit regulatorischen Vorgaben wie der EU-Taxonomie oder der kommenden Bauproduktverordnung verbinden. So kann sie nicht nur als Entwurfshilfe dienen, sondern auch als Vermittlungsinstrument zwischen Planungszielen, Bewertungskriterien und förderpolitischen Maßnahmen auf kommunaler oder nationaler Ebene eingesetzt werden.

6.3 Umnutzungsmatrix für Wandel: Planungshilfe für zirkuläres Bauen

Die Umnutzungsmatrix dient als strategisches Instrument zur Unterstützung planerischer Entscheidungen im Kontext des zirkulären Bauens im Bestand. Sie ermöglicht eine systematische Gewichtung unterschiedlicher Zielsetzungen, die in frühen Planungsphasen festgelegt werden sollten. Dazu zählen Klimaschutz, Ressourcenschonung, Kreislauffähigkeit, Flächenqualität, Wirtschaftlichkeit sowie der Erhalt bestehender Strukturen und Identitäten.

Mit Blick auf diese Zielprioritäten bietet die Matrix konkrete Handlungsempfehlungen in den Bereichen Architektur, Konstruktion, Materialwahl, Massebewertung, Treibhausgasbilanz und Kostenstruktur. Sie macht sichtbar, welche Entwurfs- und Konstruktionsstrategien sich aus einer bestimmten Zielausrichtung ergeben und wie diese aufeinander abgestimmt werden können. Darüber hinaus erlaubt die Matrix eine transparente und nachvollziehbare Herleitung von Umnutzungsstrategien, die in drei grundsätzliche Kategorien gegliedert sind: Bestandssicherung mit minimalen Eingriffen, stofflich optimierte Reduktion und funktional-räumliche Erweiterung unter Berücksichtigung zirkulärer Prinzipien.

Die Umnutzungsmatrix fördert die Integration technischer, ökologischer und ökonomischer Parameter in den architektonischen Entscheidungsprozess. Sie bietet damit eine fundierte Grundlage zur Entwicklung tragfähiger, ressourcenschonender und langfristig anpassungsfähiger Entwurfskonzepte im Gebäudebestand.

Einfach mal anwenden und probieren!

Step 1: Vordefinition

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Variante 1 – Bestandwahrung	□	Minimale Eingriffe, Wiederverwendung, niedrige Rückbaukosten
Variante 2 – stofflich optimierte Subtraktion	□	Recyclingorientiert, CO_2-reduziert, hohe Materialeffizienz
Variante 3 – zukunftsgerichtete Erweiterung	□	Neue Lernräume, hohe Zirkularität, hochwertiger Masseeinsatz

Step 2: Architektur / Raumkonzept

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Fokus auf Flächenqualität	□	Open-Space-Zonen, flexible Grundrisse, Aufenthaltsflächen erhöhen
Ressourcenschutz (Primärrohstoffe)	□	Grundrisslogik erhalten, minimalinvasiver Umbau
Fokus auf Bestanderhalt	□	Wiederverwendung tragender Strukturen, modulare Raumgliederung
Fokus auf Kreislauf	□	qualitative Bewertung

Step 3: Konstruktion und Fügung

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Fokus auf Rückbaubarkeit	□	Schraubbare statt verklebter Verbindungen, sortenreine Einbauteile
Kostenoptimierung	□	Standardisierte Bauteile, einfache Fügung, minimierter Bauteilkatalog
Masse im Blick	□	Entflechtung der Schichten, Reduktion schwer trennbarer Materialien

Step 4: Materialstrategie

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Reduktion der CO_2-Emissionen	□	Holz, Hanf, Recyclingaluminium, Glas mit Altglasanteil
Zirkularität optimieren	□	ReZiegel, Reapor, Lehmputz, Sekundärbaustoffe mit Rücknahmeverträgen
Kosten im Fokus	□	Vermeidung von Verbundmaterialien, Entsorgungskosten früh kalkulieren

Step 5: Bewertung von Masse

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Bestanderhalt stärken	□	Möglichst vollständige Nutzung der vorhandenen Gebäudemasse
PostUse sichern	□	Neue Masse nur, wenn sie vollständig demontierbar und sortenrein rückführbar ist
Ausgleich durch Qualität	□	Massezuwachs nur bei nachweisbarer Rückbaufähigkeit und Stoffwert im Kreislauf

Step 6: GWP (Global Warming Potential)

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
< 10 kgCO_2e/m²a	□	Maximale Sekundärmaterialien, kurze Lieferketten, Modul A1–A3 optimieren
10–15 kgCO_2e/m²a	□	Bestandserhalt kombiniert mit Materialsubstitution
> 15 kgCO_2e/m²a	□	Kompensation über Begrünung, PV oder CO_2-bindende Baustoffe

Step 7: Wirtschaftlichkeit (Lebenszykluskosten)

Zielgewichtung	Priorität	Empfehlung
Rückbaukosten niedrig halten	□	biologische Dämmstoffe, mineralische Putze, vermeidbare Kunststoffe
Rückbauerlöse aktivieren	□	Glas, Stahl, Kupfer, recycelbare Fassadenverkleidungen
Gesamtbetriebskosten senken	□	Materialien mit geringer Wartungsintensität und langer Lebensdauer

Step 8: Zieldefinition: Was ist das primäre Ziel des Umbaus?

Zielsetzung	Priorität	Zielwert (bitte notieren)	Einheit
Klimaschutz (CO_2-Minimierung)	□		CO_2e/m²a
Ressourcenschutz (Primärrohstoffe)	□		Anteil Primärrohstoffe
Kreislauffähigkeit (CPX-Wert)	□		CPX
Flächenqualitäten (Lernumgebung)	□		qualitative Bewertung
Wirtschaftlichkeit (Rückbaukosten)	□		m² Entsorgungskosten max.
Bestanderhalt (Identität, Struktur)	□		ve Bewertung

Foto: https://stock.adobe.com/de/search?filters%5Bcontent_type%3Aphoto%5D=1&filters%5Bcontent_type%3Aillustra-



7 FAZIT

Das Fazit führt die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt eine klare Antwort auf die Frage, wie die Transformation eines Bestandsgebäudes zukunftsfähig gestaltet und bewertet werden kann. Deutlich wird, dass gestalterische Entscheidungen allein nicht ausreichen. Erst durch die Integration quantifizierbarer Kriterien wie Kreislauffähigkeit, Rückbaupotenzial, Emissionsbilanzen und Kosten entsteht ein belastbarer Bewertungsrahmen. Der Gebäudebestand wird nicht als Einschränkung, sondern als materielle und räumliche Ressource verstanden. Die entwickelten Entwurfsvarianten und Bewertungsmethoden zeigen, wie sich Planungsprozesse anpassen lassen, um Bestand neu zu denken – funktional, ökologisch und sozial.

Fazit

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die Transformation von Bestandsgebäuden ein hochkomplexer, mehrdimensionaler Prozess ist, der weit über gestalterische Eingriffe hinausgeht. Ausgangspunkt der Untersuchung war die Frage, wie sich eine zukunftsfähige Weiterentwicklung eines bestehenden Gebäudes ganzheitlich bewerten und methodisch fundiert gestalten lässt. Die Analyse hat deutlich gemacht, dass dies nur durch die Integration architektonischer, materialbezogener, ökologischer, ökonomischer sowie nutzungsorientierter Kriterien möglich ist.

Zentrale theoretische Bezugspunkte waren die Schichtentheorie von Steward Brand, welche die Trennbarkeit und Austauschbarkeit der Gebäudeschichten zur Grundlage langfristiger Anpassungsfähigkeit macht, sowie das Konzept der Circular Economy, das auf eine systematische Umstellung linearer Ressourcenflüsse in zyklische Prozesse abzielt. Die in der Arbeit berücksichtigten rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere im Bereich der Abfallgesetzgebung, der Landesbauordnungen und der Lebenszykluskostenrechnung, verdeutlichen, dass diese Transformation nicht allein in der Verantwortung der Planenden liegt, sondern in einen regulatorischen und marktwirtschaftlichen Kontext eingebettet ist. Die theoretischen Grundlagen bildeten die methodische Basis für die Analyse adaptiver und zirkulärer Fallbeispiele, deren Untersuchung notwendig war, um das Verhältnis von Prinzipien und Realität, von Potenzialen und Grenzen zu erfassen.

Die betrachteten Fallstudien zeigten, dass erfolgreiche Umbauten vor allem dann gelingen, wenn Modularität, reversible Fügung, robuste Tragstrukturen und langfristig nutzbare Raumordnungen in ein konsistentes architektonisches Konzept überführt werden. Es lässt sich jedoch kein allgemeingültiges Modell ableiten, da jedes Projekt spezifische Anforderungen aufweist. So ist nicht jede modulare Struktur per se vorteilhaft. Die Bewertung hängt vielmehr davon ab, ob Raumraster, Materialwahl

und strukturelle Offenheit flexibel auf zukünftige Nutzungen reagieren können. Die Analyse hat auch verdeutlicht, dass eine starre Fokussierung auf modulares Bauen nicht zielführend ist, wenn dadurch andere Qualitäten wie Raumtiefe, Belichtung oder soziale Aufenthaltsqualitäten eingeschränkt werden.

Die Untersuchung des Felix-Fechenbach-Berufskollegs zeigte auf drei analytischen Ebenen, welches Potenzial und welche Herausforderungen im Bestand liegen. Auf städtebaulicher Ebene nimmt das Gebäude eine wichtige Rolle in seinem Quartier ein, es erfüllt Bildungs-, Integrations- und Identifikationsfunktionen. Auf funktionaler Ebene weist das Schulgebäude eine klare Tragstruktur mit einem prägenden Stützenraster auf, welches Flexibilität in der Umnutzung begünstigt. Ergänzt wird dies durch eine funktional sinnvolle Fassadenlogik. Die Erschließung und die Kombination aus Lager, Lehre und Werkstatt wurden von den Nutzenden positiv bewertet. Demgegenüber bestehen Defizite hinsichtlich Belichtung, Gemeinschaftszonen und der Beziehung zwischen Innenraum und Außenraum. Auf materieller Ebene erschwerten Schadstoffe und starre Verbindungen eine vollständige Rückführung, gleichzeitig konnten durch eine differenzierte Analyse zahlreiche Bestandselemente mit hohem Wiederverwertungspotenzial identifiziert werden.

Die drei entwickelten Entwurfsvarianten illustrieren unterschiedliche Strategien und Zielsetzungen. Variante 1 verfolgt einen konservativen Weg, indem sie Eingriffe minimiert und den Bestand größtenteils erhält. Variante 2 zeigt eine gezielte stoffliche Optimierung mit Fokus auf Recyclingfähigkeit und Substitution energieintensiver Materialien. Variante 3 formuliert ein räumlich innovatives Konzept, das auf neue Lernwelten, offene Raumstrukturen und eine konstruktiv hochwertige Kreislaufführung setzt. In der Bewertung wurde deutlich, dass jede Variante spezifische Stärken aufweist. Diese lassen sich sowohl anhand quantitativer Indikatoren wie dem CPX-Wert, der CO_2-Bilanz oder den Rückbaukosten als auch anhand qualitativer Kriterien wie Raumqualität, Nutzungsflexibi-

lität und gestalterischer Haltung nachvollziehen.

Die Verbindung zwischen Nutzerfeedback, digitalen Tools und architektonischer Analyse hat sich als besonders wirksam erwiesen. Die Rückmeldungen aus Interviews und Umfragen bestätigten vielfach die Annahmen der planerischen Untersuchung. Die Anwendung von Concular und die anschließende Weiterentwicklung der Bewertungslogik in einer Excel-Matrix erlaubten eine präzise Erfassung und Bewertung der Rückbau- und Wiederverwendungspotenziale. Diese Kombination technischer und sozialer Dimensionen trägt wesentlich zur Validität der Ergebnisse bei und zeigt, wie digitale Instrumente an reale Bedarfe angepasst werden können. In der Beantwortung der Forschungsfrage lässt sich festhalten, dass eine zukunftsfähige Transformation eines Bestandsgebäudes nur auf Basis einer mehrschichtigen Bewertung möglich ist. Gestalterische Qualitäten sind notwendig, aber nicht hinreichend. Erst die Kombination mit messbaren Kenngrößen wie Kreislauffähigkeit, CO_2-Emissionen und Rückbaukosten ermöglicht belastbare Aussagen über die tatsächliche Nachhaltigkeit eines Entwurfskonzepts. Dabei kommt der Einbindung des Kontexts und der Nutzenden eine zentrale Rolle zu, denn ein Gebäude, das nicht sozial akzeptiert, funktional nutzbar und materiell rückführbar ist, bleibt im Widerspruch zu den Zielen zirkulärer Architektur.

Im Abgleich mit dem Forschungsstand bestätigen sich die theoretischen Konzepte von Wong, Brand und der Circular Economy nicht nur, sondern lassen sich konkret im Projekt nachvollziehen. Die Idee des Wachsens durch Anpassung, der Trennung in zeitspezifische Schichten sowie der ressourcenbewussten Materialwahl prägt sämtliche Varianten der Planung. Der in der Arbeit entwickelte Bewertungsansatz, insbesondere die Umnutzungsmatrix, stellt eine Erweiterung bestehender Werkzeuge dar und ermöglicht eine systematische Verknüpfung zwischen architektonischer Entscheidung und Kreislaufindikatorik. Gleichzeitig zeigte sich, dass digitale Tools wie Concular, der Urban Mining Index und LCA-Werkzeuge bislang nur begrenzt in der Lage sind, Rückbaupfade,

Schadstoffpotenziale und PostUse-Szenarien umfassend abzubilden. Hier liegt ein dringender Bedarf an Weiterentwicklung und Integration in Planungs- und Förderprozesse.

Die vorliegende Arbeit schlägt daher einen erweiterten methodischen Zugriff vor, der technische, architektonische, soziale und wirtschaftliche Perspektiven zusammenführt. Die Idee eines Transformationsraumes als neutraler Ort reicht nicht aus, wenn nicht auch die Bedingungen seiner Wiederverwendung, seine Materialgeschichte und seine gesellschaftliche Funktion mitgedacht werden. Die Vorstellung eines Transition of Spaces kann nur dann tragfähig sein, wenn sie mit klaren Planungsparametern und langfristig überprüfbaren Zielen verknüpft wird.

Im Hinblick auf zukünftige Forschung empfiehlt sich eine systematische Weiterentwicklung von Planungsinstrumenten, die Kreislauffähigkeit, Nutzungsoffenheit und Lebenszykluskosten in einer gemeinsamen Bewertungslogik zusammenführen. Der CPX-Wert bietet hier einen ersten Ansatz, der jedoch weiterentwickelt und qualifiziert werden muss. Die Entwicklung reversibler Konstruktionssysteme, insbesondere in Bereichen wie Fassaden, Ausbau und Tragstruktur, sollte intensiver erforscht werden. Ebenso ist es sinnvoll, Rückbausituationen praktisch zu begleiten, um durch Kooperation mit Handwerksbetrieben, Bauunternehmen und Herstellern Erkenntnisse über Rückführung, Materialwert und Prozesshindernisse zu gewinnen. Daraus könnten neue regionale Geschäftsmodelle und spezialisierte Dienstleistungsangebote für Rückbau und Wiederverwendung entstehen.

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf weitere Gebäudetypologien übertragen. Besonders bei öffentlichen Verwaltungsbauten, aber auch bei hybriden Mischnutzungen, könnte das methodische Vorgehen dieser Arbeit angewendet und weiterentwickelt werden. Dabei wird deutlich, dass sich die Anwendung zirkulärer Planungsansätze nicht nur in der Tiefe verbessert, sondern auch in der Breite ausgedehnt werden kann. Jedes neue

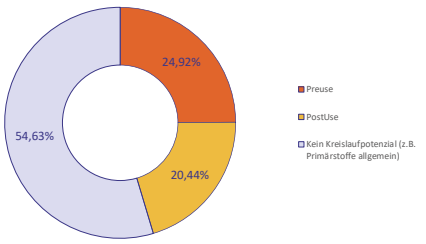
Projekt bietet die Chance, aus Anwendungserfahrung weiteres Wissen zu generieren und das System der zirkulären Architektur Stück für Stück robuster zu machen. Die Arbeit weist methodisch eine besondere Stärke in der Verbindung von Schichtentrennung, Materialbewertung, Nutzerperspektive und Variantenentwicklung auf. Diese mehrdimensionale Herangehensweise eröffnet realistische und zugleich zukunftsgerichtete Perspektiven für den Umgang mit Bestandsgebäuden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Datenlage begrenzt, die Genauigkeit der Werkzeuge uneinheitlich und ihre Schnittstellen noch nicht ausgereift sind. Die Variantenentwicklung zeigte kreative Ansätze, die jedoch in ihrer baurechtlichen und wirtschaftlichen Umsetzung weiter vertieft und konkretisiert werden müssten. Manche konstruktiven Prinzipien verstoßen gegen bestehende Normen und erfordern Einzelfallentscheidungen, was den Planungsaufwand erhöht. Dennoch ist es wichtig, diese Konzepte darzustellen, um die Debatte über notwendige Veränderungen in der Planungs- und Ausführungslogik zu stimulieren. Für künftige Arbeiten wäre es zielführend, stärker bauordnungsrechtliche und fördertechnische Fragen zu integrieren, aber auch normative Systeme zu hinterfragen und so aktiv zur Weiterentwicklung des nachhaltigen Bauens beizutragen.

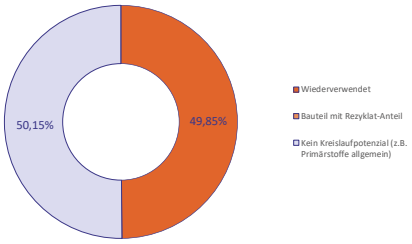
ANHANG

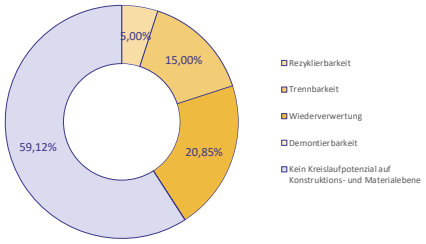
Variante 0

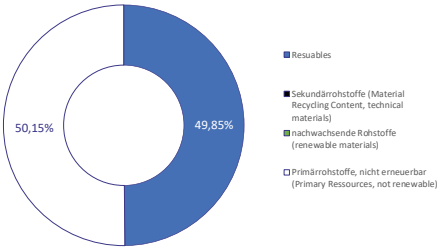
Übersicht Außenwand

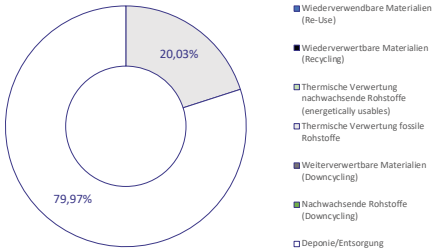
CPX







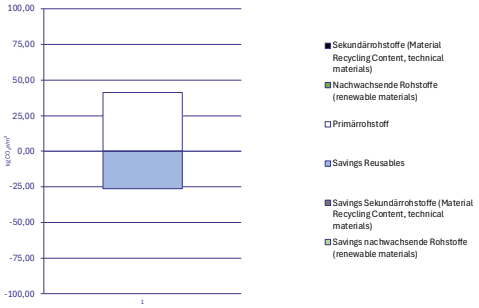




Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbarkeit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Stahlbeton Fertigteil 1	0,04	504,03	0,21	0,01	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	0,01
EPS 1	0,00	20,00	0,12	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,12	0,00
Stahlbeton Fertigteil 1	0,04	504,03	0,71	0,03	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,02	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	0,01

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Stahlbeton Fertigteil 1	Primärrohstoff	170101 Beton	26,31	25,21	0,00	1,10	-0,20	0,00
EPS 1	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	14,69	7,67	0,00	7,03	-2,91	0,00
Stahlbeton Fertigteil REUSE	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,10

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	41,00
Savings Reusables	-26,10
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

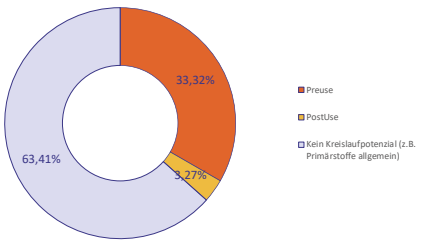
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

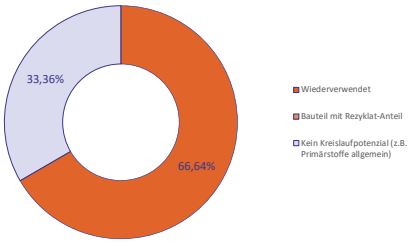
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Stahlbeton Fertigteil 1	Primärrohstoff	1850493,196	3671,59	-33,00 €	-61.066,28 €	-5,53 €
EPS 1	Primärrohstoff	26141,29609	3671,59	-1.496,00 €	-39.107,38 €	-3,54 €
Stahlbeton Fertigteil REUSE	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1865321,64	3701,02	-33,00 €	-61.555,61 €	-5,57 €

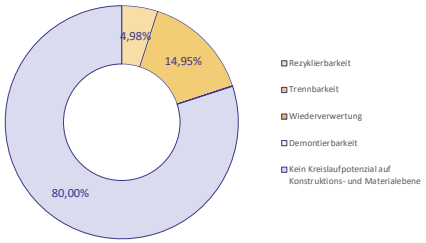
Variante 0

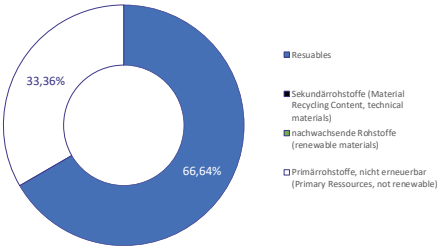
Übersicht Boden

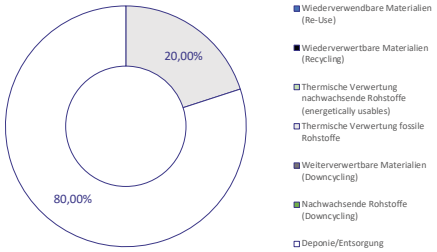
CPX





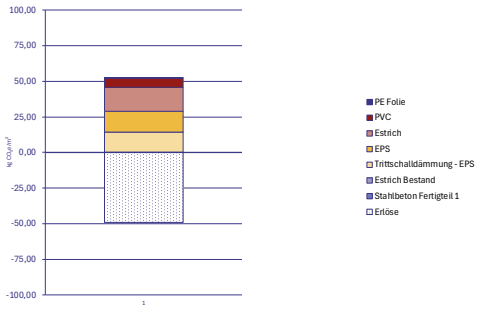


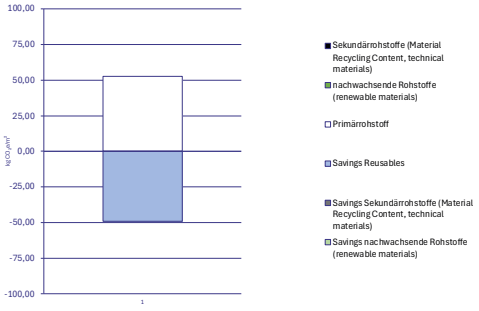




Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
PE Folie	0,08	974,75	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
PVC	1,29	16163,05	0,02	0,03	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,06	0,02	0,03
Estrich	134,61	1681438,55	0,10	13,46	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	6,73	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	20,19	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	13,46
EPS	2,24	28023,98	0,12	0,27	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,34	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,10	0,12	0,27
Trittschalldämmung - EPS	2,24	28023,98	0,12	0,27	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,34	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,10	0,12	0,27
Estrich Bestand	36,58	456944,20	0,60	21,95	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	18,29	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	1,83	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	5,49	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	3,66
Stahlbeton Fertigteil 1	243,99	3047618,02	0,60	146,39	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	121,99	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	12,20	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	36,60	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	24,40

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Estrich	Primärrohstoff	170101 Beton	7,34	6,37	0,00	0,97	0,00	0,00
Abhangdecke Metall	Primärrohstoff	170407 Metall	4,52	4,52	0,00	0,00	-3,15	0,00
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	6,25	3,00	0,00	3,25	-1,35	0,00
PE-Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,49	0,22	0,00	0,27	-0,12	0,00
PVC	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	8,02	4,03	0,00	3,99	-0,89	0,00
Abhangsystem	Primärrohstoff	170407 Metall	0,74	0,74	0,00	0,00	-0,51	0,00
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,57
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	27,37
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

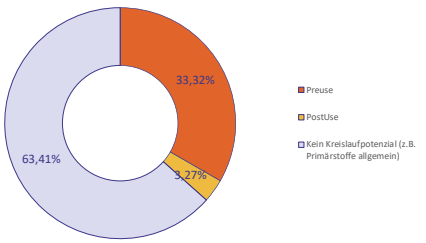
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

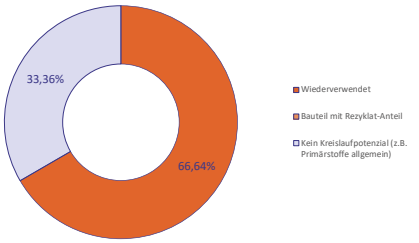
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
PE Folie	Primärrohstoff	974,7469852	4873,76	-353,00 €	-344,09 €	-0,01 €
PVC	Primärrohstoff	16163,05238	4873,76	-353,00 €	-5.705,56 €	-0,16 €
Estrich	Primärrohstoff	1681438,553	4873,76	-33,00 €	-55.487,47 €	-1,52 €
EPS	Primärrohstoff	28023,97588	4873,76	-1.496,00 €	-41.923,87 €	-1,15 €
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	28023,97588	4873,76	-1.496,00 €	-41.923,87 €	-1,15 €
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	456944,2005	6092,60	-33,00 €	-15.079,16 €	-0,41 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	3047618,019	6092,60	-33,00 €	-100.571,39 €	-2,75 €

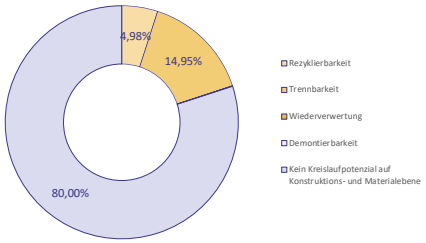
Variante 0

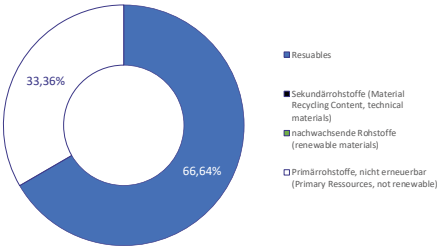
Übersicht Boden

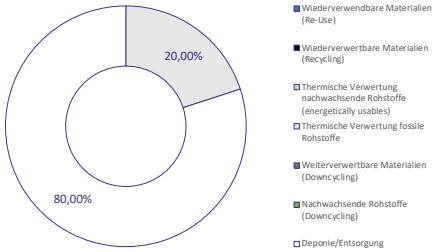
CPX





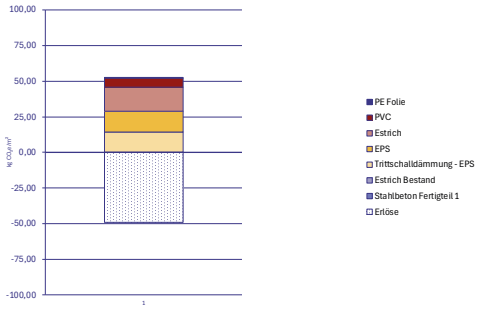


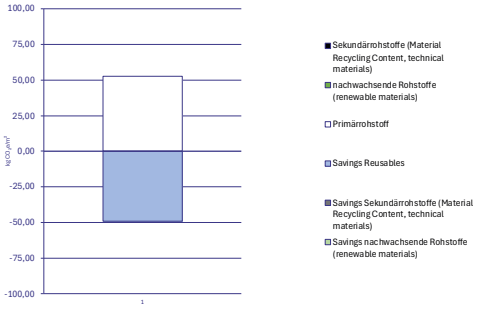




Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
PE Folie	0,08	974,75	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
PVC	1,29	16163,05	0,02	0,03	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,06	0,02	0,03
Estrich	134,61	1681438,55	0,10	13,46	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	6,73	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	20,19	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	13,46
EPS	2,24	28023,98	0,12	0,27	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,34	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,10	0,12	0,27
Trittschalldämmung - EPS	2,24	28023,98	0,12	0,27	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,34	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,10	0,12	0,27
Estrich Bestand	36,58	456944,20	0,60	21,95	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	18,29	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	1,83	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	5,49	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	3,66
Stahlbeton Fertigteil 1	243,99	3047618,02	0,60	146,39	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	121,99	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	12,20	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	36,60	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	24,40

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Estrich	Primärrohstoff	170101 Beton	7,34	6,37	0,00	0,97	0,00	0,00
Abhangdecke Metall	Primärrohstoff	170407 Metall	4,52	4,52	0,00	0,00	-3,15	0,00
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	6,25	3,00	0,00	3,25	-1,35	0,00
PE-Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,49	0,22	0,00	0,27	-0,12	0,00
PVC	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	8,02	4,03	0,00	3,99	-0,89	0,00
Abhangsystem	Primärrohstoff	170407 Metall	0,74	0,74	0,00	0,00	-0,51	0,00
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,57
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	27,37
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

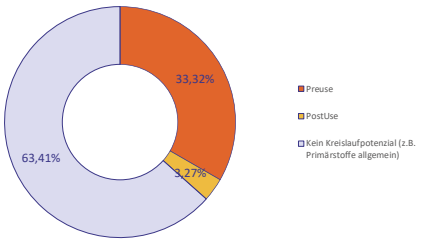
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

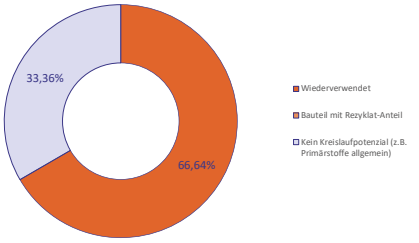
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten/ -erlöse [€/t]	Verwertungskosten/ -erlöse [€/ gesamt]	[€/m2]
Estrich	Primärrohstoff	725682,654	6148,7	-33,00 €	-23.947,53 €	-0,59 €
Abhangdecke Metall	Primärrohstoff	5245,988223	5246,01	270,00 €	1.416,42 €	0,03 €
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	12094,7109	6148,7	-1.496,00 €	-18.093,69 €	-0,45 €
PE-Folie	Primärrohstoff	1229,727941	6148,7	-353,00 €	-434,09 €	-0,01 €
PVC	Primärrohstoff	20290,51102	6148,7	-353,00 €	-7.162,55 €	-0,18 €
Abhangsystem	Primärrohstoff	856,164766	856,55	270,00 €	231,16 €	0,01 €
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	353176,29	4122,02	-33,00 €	-11.654,82 €	-0,29 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2921527,437	5796,92	-33,00 €	-96.410,41 €	-2,37 €

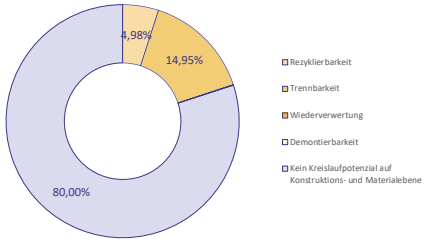
Variante 0

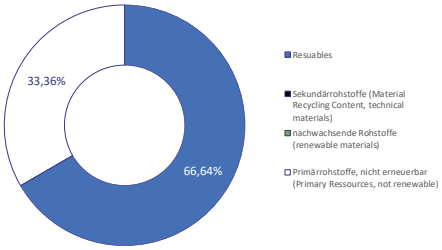
Übersicht Decke

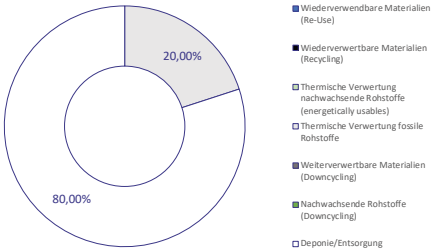
CPX







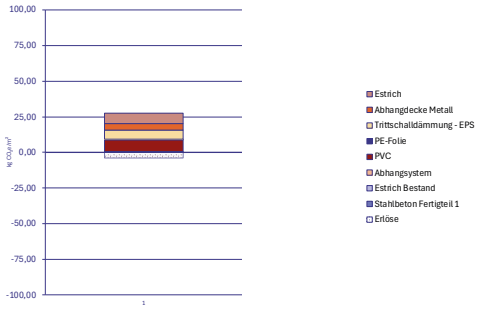


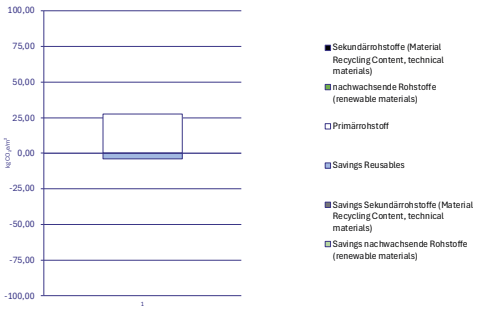


368

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Estrich	58,10	725682,65	0,10	5,81	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,25	0,05	2,90	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	8,71	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	5,81
Abhangdecke Metall	0,42	5245,99	0,41	0,17	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,75	0,15	0,06	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,06	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,09	lose	1,00	0,30	0,13	0,41	0,17
Trittschalldämmung - EPS	0,97	12094,71	0,12	0,12	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,05	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,15	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,04	0,12	0,12
PE-Folie	0,10	1229,73	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
PVC	1,62	20290,51	0,02	0,04	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,07	0,02	0,04
Abhangsystem	0,07	856,16	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
Estrich Bestand	28,27	353176,29	0,60	16,96	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	14,14	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	1,41	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	4,24	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	2,83
Stahlbeton Fertigteil 1	233,89	2921527,44	0,60	140,33	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	116,95	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	11,69	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	35,08	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,10	23,39

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m^2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m^2	GWP D (kg CO_2e)/ m^2	Erlöse (kg CO_2e)/ m^2
PE Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,39	0,18	0,00	0,22	-0,10	0,00
PVC	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	6,39	3,21	0,00	3,18	-0,71	0,00
Estrich	Primärrohstoff	170101 Beton	17,00	14,76	0,00	2,24	0,00	0,00
EPS	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	14,49	6,95	0,00	7,54	-3,12	0,00
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	0,00	6,95	0,00	7,54	-3,12	0,00
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,30
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,98

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	52,76
Savings Reusables	-49,28
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
PE Folie	Primärrohstoff	974,7469852	4873,76	-353,00 €	-344,09 €	-0,01 €
PVC	Primärrohstoff	16163,05238	4873,76	-353,00 €	-5.705,56 €	-0,16 €
Estrich	Primärrohstoff	1681438,553	4873,76	-33,00 €	-55.487,47 €	-1,52 €
EPS	Primärrohstoff	28023,97588	4873,76	-1.496,00 €	-41.923,87 €	-1,15 €
Trittschalldämmung - EPS	Primärrohstoff	28023,97588	4873,76	-1.496,00 €	-41.923,87 €	-1,15 €
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	456944,2005	6092,60	-33,00 €	-15.079,16 €	-0,41 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	3047618,019	6092,60	-33,00 €	-100.571,39 €	-2,75 €

Variante 0

Übersicht Dach

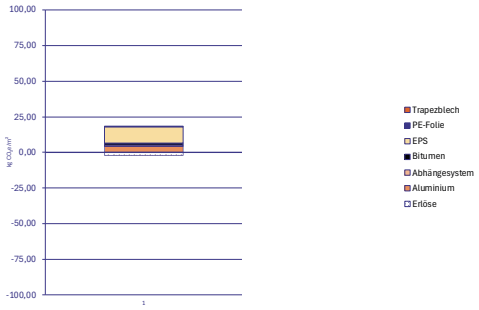
CPX

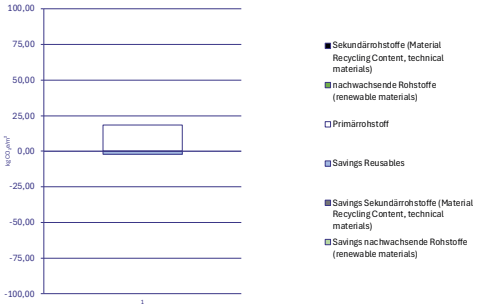


370

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Trapez-blech	0,21	2590,89	0,76	0,16	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,10	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,03	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,03	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,04	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,26	0,05
PE-Folie	0,09	1133,02	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
EPS	1,81	22660,45	0,23	0,41	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,09	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,27	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,38	verklebt	0,15	0,05	0,08	0,23	0,41
Bitumen	2,27	28325,56	0,33	0,75	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,34	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,48	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,58	0,33	0,75
Abhänge-system	0,07	884,88	0,33	0,02	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,02	0,33	0,02
Aluminium	0,40	5006,51	0,33	0,13	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	0,02	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,06	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,08	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,10	0,33	0,13

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Trapezblech	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23
PE-Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,46	0,20	0,00	0,25	-0,11	0,00
EPS	Primärrohstoff	170604 Dämmstoffe	11,52	5,42	0,00	6,10	-2,52	0,00
Bitumen	Primärrohstoff	170302 Bitumengemische	1,40	1,32	0,00	0,08	0,00	0,00
Abhängesystem	Primärrohstoff	170407 Metall	0,76	0,76	0,00	0,00	-0,53	0,00
Aluminium	Primärrohstoff	170407 Metall	4,32	4,32	0,00	0,00	-3,01	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	18,46
Savings Reusables	-2,23
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

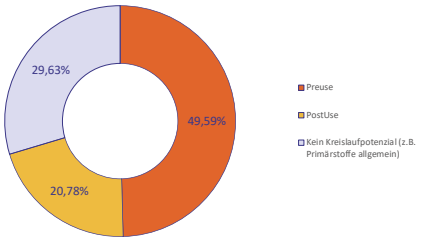
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

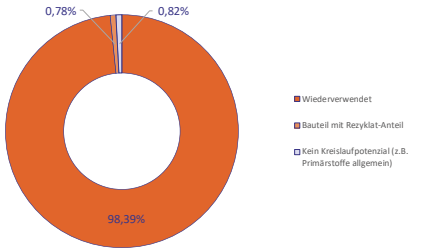
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Trapezblech	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2590,8905	2635,13	270,00 €	699,54 €	0,02 €
PE-Folie	Primärrohstoff	1133,022594	5665,11	-353,00 €	-399,96 €	-0,01 €
EPS	Primärrohstoff	22660,45184	11330,22	-1.496,00 €	-33.900,04 €	-1,09 €
Bitumen	Primärrohstoff	28325,56484	5665,11	-248,00 €	-7.024,74 €	-0,23 €
Abhängesystem	Primärrohstoff	884,877718	884,96	270,00 €	238,92 €	0,01 €
Aluminium	Primärrohstoff	5006,505258	5006,51	270,00 €	1.351,76 €	0,04 €

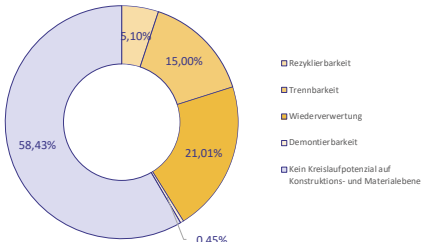
Variante 1

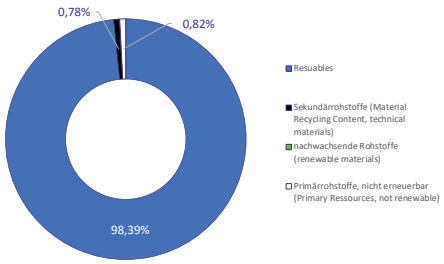
Übersicht Außenwand

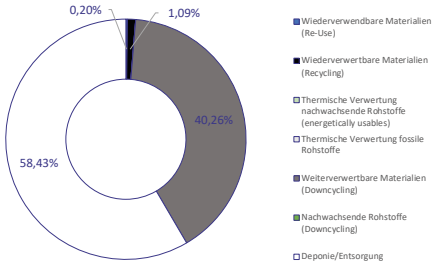
CPX







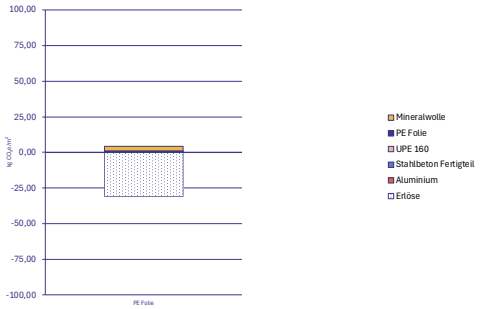


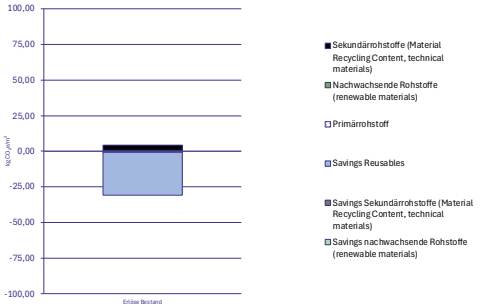


372

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
PE Folie	0,06	756,25	0,08	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	Klemmbefestigung	0,50	0,15	0,01	0,08	0,00
UPE 160	0,06	692,00	0,67	0,04	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,5	0,25	0,01	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,01	Maschinelle Trennung mit tragbaren Geräten	0,85	0,17	0,01	Einfache Aufbereitung notwendig (z.B. Anstrich)	0,90	0,27	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,01	0,42	0,02
Stahlbeton Fertigteil 1	153,86	1921925,00	0,71	108,47	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1	0,50	76,93	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	7,69	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	23,08	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	32,31	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	31,54
Aluminium	0,30	3781,24	0,95	0,29	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1	0,50	0,15	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,05	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,06	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	0,09	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,08	0,45	0,14
Mineralwolle	2,40	29971,54	0,61	1,46	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,5	0,25	0,60	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,24	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,36	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,50	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,61	0,36	0,86

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
PE Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,61	0,14	0,17	0,30	-0,15	0,00
UPE 160	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170407 Metall	0,60	0,60	0,00	0,00	-0,42	0,00
Stahlbeton Fertigteil	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,10
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	3,00	3,04	0,04	0,00	-0,08	0,61

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,60
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,16
Primärrohstoff	28,86
Savings Reusables	-4,06
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-0,01
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

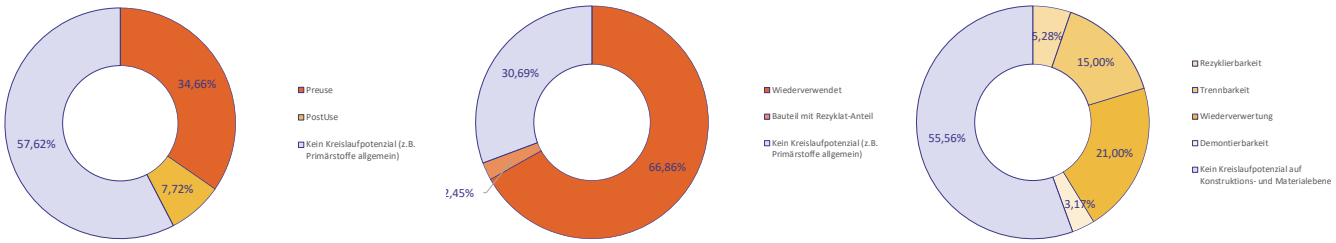
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

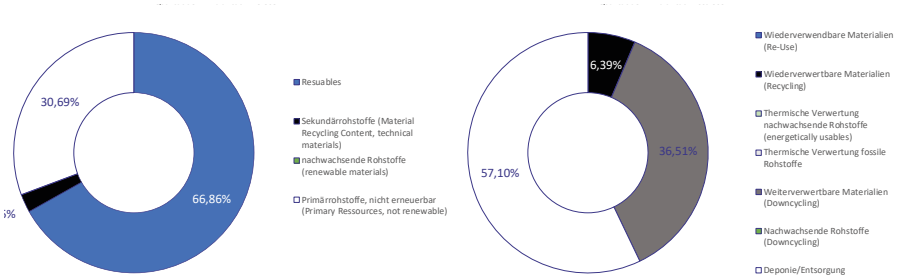
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
PE Folie	Primärrohstoff	756,25	3781,19	-353,00 €	-266,96 €	-0,02 €
UPE 160	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	692,00	756,2	270,00 €	186,84 €	0,01 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1921925,00	3813,3	-33,00 €	-63.423,53 €	-3,99 €
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	3781,24	3781,19	1.895,00 €	7.165,46 €	0,45 €
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	29971,54	3781,19	-1.496,00 €	-44.837,42 €	-2,82 €

Variante 1

Übersicht Boden

CPX

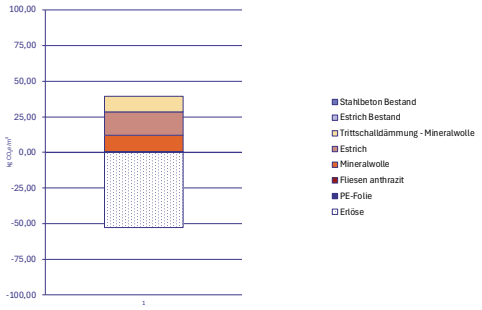


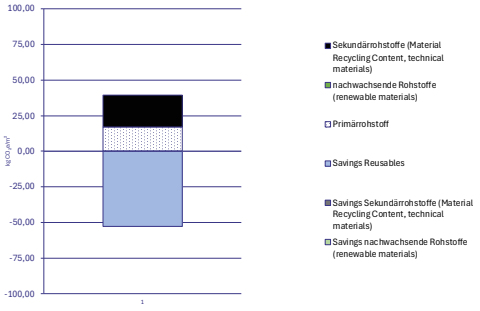


374

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
PE-Folie	0,09	1155,54	0,00	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	kraftschlüssig verbunden	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fliesen anthrazit	9,89	123527,54	0,75	7,44	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	4,94	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,99	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	1,48	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	2,08	angemörtelt	0,15	0,05	0,45	0,25	2,50
Mineralwolle	7,27	90773,12	0,63	4,56	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	2,73	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,73	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	1,09	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,53	verklebt	0,15	0,05	0,33	0,25	1,83
Estrich	129,56	1618370,00	0,21	26,56	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	6,48	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	19,43	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	27,21	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	26,56
Trittschalldämmung - Mineralwolle	6,93	86589,83	0,76	5,23	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	2,60	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,69	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	1,04	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,46	lose	1,00	0,30	2,08	0,38	2,63
Estrich	36,37	454293,40	0,86	31,10	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	18,18	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	1,82	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	5,46	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	7,64	lose	1,00	0,30	10,91	0,36	12,91
Stahlbeton Fertigteil 1	243,99	3047618,02	0,71	172,01	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	121,99	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	12,20	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	36,60	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	51,24	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	50,02
Stahlbeton Fertigteil 1	236,66	2956133,63	0,71	166,85	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	118,33	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	11,83	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	35,50	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	49,70	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	48,52

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
PE-Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,47	0,21	0,00	0,26	-0,11	0,00
Fliesen anthrazit	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,32
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	11,44	11,10	0,00	0,34	0,00	0,00
Estrich	Primärrohstoff	170101 Beton	16,36	14,21	0,00	2,15	0,00	0,00
Trittschalldämmung - Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	0,00	10,59	0,00	0,33	0,00	0,00
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,59
Stahlbeton Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,98

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	22,35
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	16,83
Savings Reusables	-52,90
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

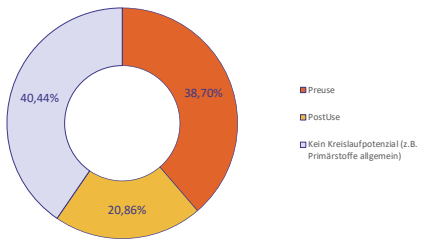
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

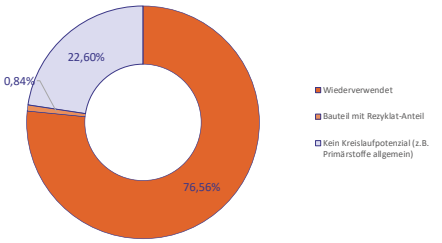
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
PE Folie	Primärrohstoff	756,25	3781,19	-353,00 €	-266,96 €	-0,02 €
UPE 160	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	692,00	756,2	270,00 €	186,84 €	0,01 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1921925,00	3813,3	-33,00 €	-63.423,53 €	-3,99 €
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	3781,24	3781,19	1.895,00 €	7.165,46 €	0,45 €
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	29971,54	3781,19	-1.496,00 €	-44.837,42 €	-2,82 €

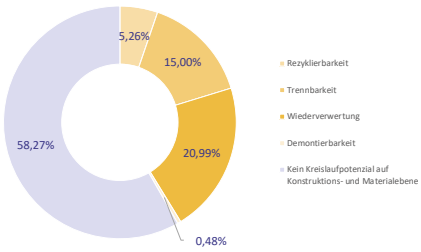
Variante 1

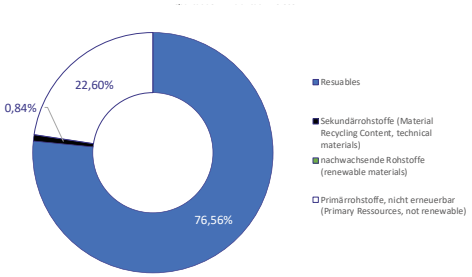
Übersicht Decke

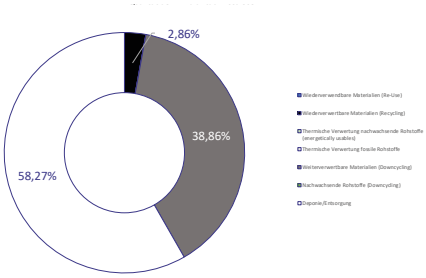
CPX







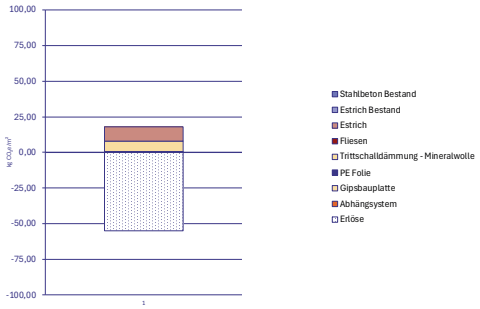


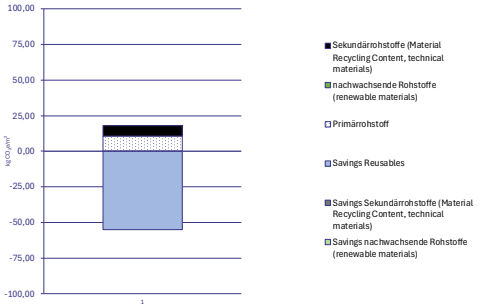


376

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Abhängesystem	0,07	917,72	0,86	0,06	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,04	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,02	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,02	0,36	0,03
Gipsbauplatte	4,28	53516,56	0,73	3,14	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	1,61	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,43	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	0,64	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,90	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	1,09	0,36	1,53
PE Folie	0,10	1284,89	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00
Trittschalldämmung - Mineralwolle	4,55	56859,48	0,25	1,15	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,46	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,68	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,96	verklebt	0,15	0,05	0,20	0,25	1,15
Fliesen	11,00	137354,24	0,75	8,27	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	5,50	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	1,10	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	1,65	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	2,31	angemörtelt	0,15	0,05	0,49	0,25	2,78
Estrich	80,45	1005069,07	0,21	16,49	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	4,02	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	12,07	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	16,89	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	16,49
Estrich Bestand	44,23	552538,14	0,71	31,19	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	22,12	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	2,21	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	6,64	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	9,29	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	9,07
Stahlbeton Fertigteil 1	236,66	2956133,63	0,71	166,85	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	118,33	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	11,83	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	35,50	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	49,70	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	48,52

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Abhängsystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,79
Gipsbauplatte	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170802 Gips- u. Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15
PE Folie	Primärrohstoff	170904 Baumischabfall	0,52	0,23	0,00	0,29	-0,13	0,00
Trittschalldämmung - Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	7,17	6,95	0,00	0,21	0,00	0,00
Fliesen	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,92
Estrich	Primärrohstoff	170101 Beton	10,16	8,82	0,00	1,34	0,00	0,00
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,59
Stahlbeton Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,69

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	7,17
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00
Primärrohstoff	10,68
Savings Reusables	-55,14
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

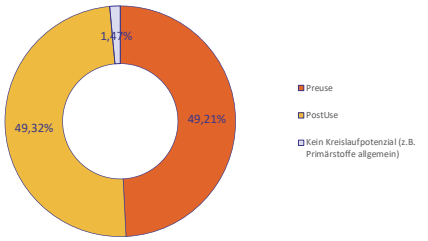
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

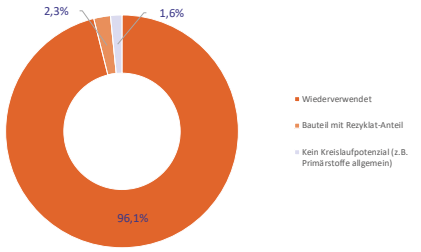
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Abhängsystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	917,721616	917,61	1.895,00 €	1.739,08 €	0,04 €
Gipsbauplatte	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	53516,56291	6296,01	-102,00 €	-5.458,69 €	-0,12 €
PE Folie	Primärrohstoff	1284,885354	6424,41	-353,00 €	-453,56 €	-0,01 €
Trittschalldämmung - Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	56859,47747	6424,41	-1.496,00 €	-85.061,78 €	-1,87 €
Fliesen	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	137354,2444	6424,41	-37,00 €	-5.082,11 €	-0,11 €
Estrich	Primärrohstoff	1005069,071	6424,41	-33,00 €	-33.167,28 €	-0,73 €
Estrich Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	552538,14	6780,18	-33,00 €	-18.233,76 €	-0,40 €
Stahlbeton Bestand	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2956133,625	5865,59	-33,00 €	-97.552,41 €	-2,14 €

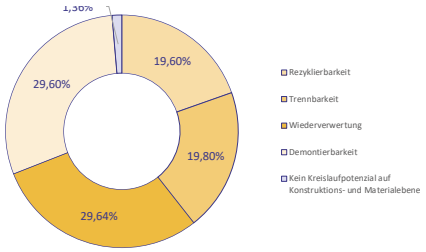
Variante 1

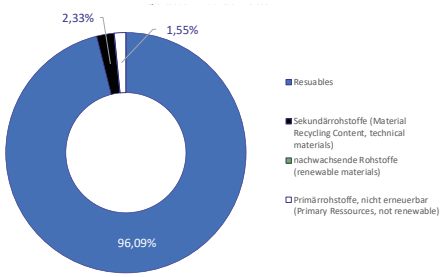
Übersicht Dach

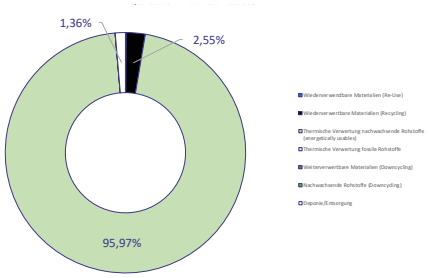
CPX







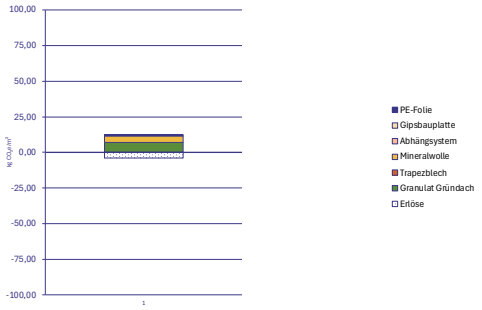


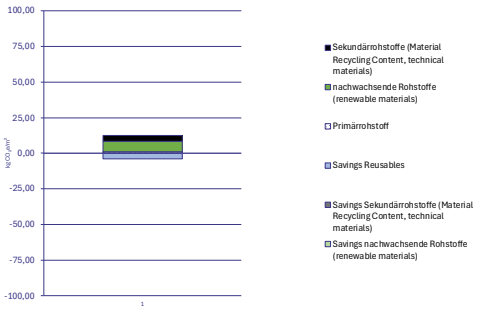


378

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Granulat Gründach	167,78	2095687,52	1,00	167,78	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	83,89	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	33,56	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	33,56	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	50,33	lose	1,00	0,30	50,33	0,50	83,89
Trapezblech	0,21	2590,89	0,92	0,19	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,10	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,03	Maschinelle Trennung mit tragbaren Geräten	0,85	0,17	0,04	Einfache Aufbereitung notwendig (z.B. Anstrich)	0,90	0,27	0,06	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,05	0,42	0,09
Mineralwolle	2,72	33990,68	0,63	1,71	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	1,02	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,27	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,41	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,57	verklebt	0,15	0,05	0,12	0,25	0,69
Abhängesystem	0,06	709,43	0,33	0,02	Primärrohstoff	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,00	0,00	0,00	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,01	0,33	0,02
Gipsbauplatte	4,06	50656,25	0,63	2,55	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,25	1,01	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,41	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,61	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,85	lose	1,00	0,30	1,22	0,38	1,54
PE-Folie	0,00	0,20	0,02	0,00	Primärrohstoff	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,00	0,02	0,00

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Granulat Gründach	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170504 Boden	7,17	5,87	0,00	1,30	-0,24	0,00
Trapezblech	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	4,18	4,06	0,00	0,13	0,00	0,00
Abhängsystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61
Gipsbauplatte	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170802 Gips- u. Gipskarton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05
PE-Folie	Primärrohstoff	170203 Kunststoffe, gemischt	0,41	0,00	0,50	0,50	-0,22	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	4,18
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	7,17
Primärrohstoff	1,01
Savings Reusables	-3,89
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

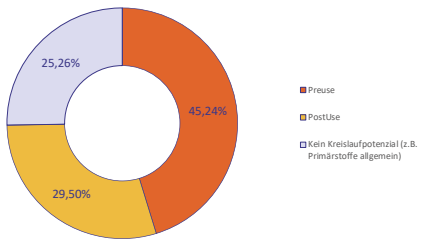
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

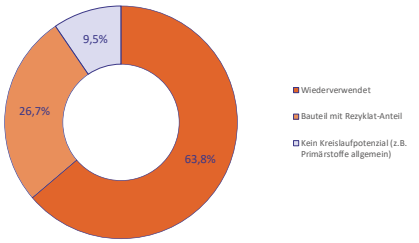
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Granulat Gründach	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	2095687,522	11330,22	-33,00 €	-69.157,69 €	-1,63 €
Trapezblech	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2590,8905	2635,13	270,00 €	699,54 €	0,02 €
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	33990,67776	11330,22	-1.496,00 €	-50.850,05 €	-1,20 €
Abhängsystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	709,429971	709,43	1.895,00 €	1.344,37 €	0,03 €
Gipsbauplatte	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	50656,25062	5065,59	-102,00 €	-5.166,94 €	-0,12 €
PE-Folie	Primärrohstoff	2266,045187	11330,22	-219,00 €	-496,26 €	-0,01 €

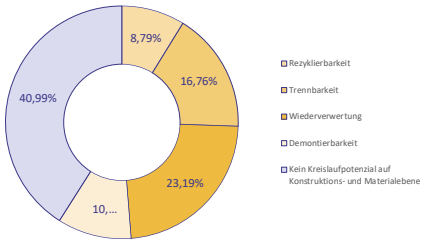
Variante 2

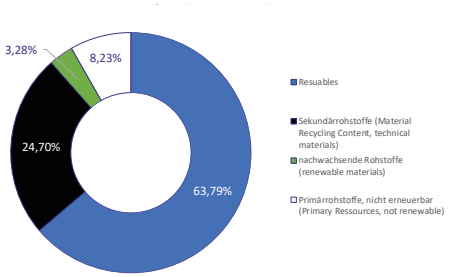
Übersicht Außenwand

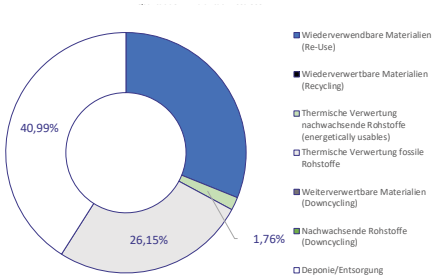
CPX







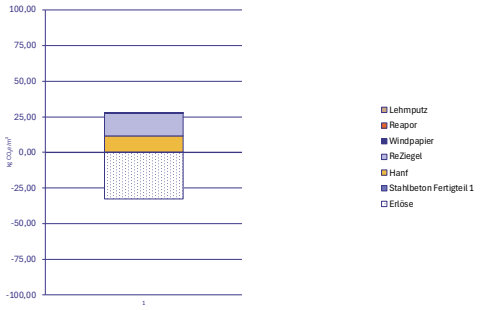


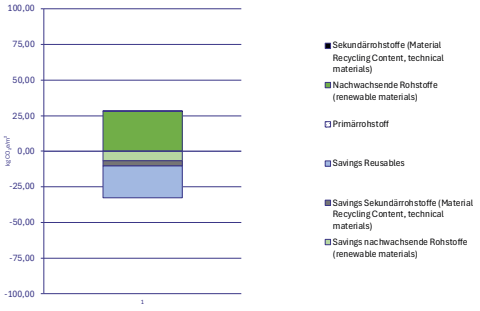


380

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Lehmputz	4,54	56684,08	0,47	2,14	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	1,13	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,91	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,91	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	angemörtelt	0,15	0,05	0,20	0,22	1,01
Reapor	2,52	31491,15	0,76	1,91	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	0,95	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,38	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	0,38	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,53	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,64	0,38	0,96
Windpapier	0,05	633,18	0,81	0,04	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,02	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,01	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	lose	1,00	0,30	0,02	0,43	0,02
ReZiegel	77,02	962103,06	0,85	65,47	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	28,88	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	11,55	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	15,40	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	23,11	lose	1,00	0,30	23,11	0,48	36,59
Hanf	3,32	41515,03	0,70	2,33	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	1,25	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,66	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,66	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,85	0,33	1,09
Stahlbeton Fertigteil 1	154,05	1924206,12	0,71	108,60	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	77,02	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,25	0,05	7,70	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	23,11	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	32,35	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	31,58

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Lehmputz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,52	0,50	0,00	0,01	-0,01	0,00
Reapor	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170202 Glas	0,08	0,07	0,00	0,01	-0,02	3,38
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,15	0,13	0,00	0,03	-0,05	0,10
ReZiegel	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	15,63	15,13	0,00	0,50	-1,01	6,75
Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	11,76	6,14	0,00	5,62	-2,33	0,00
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,61

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	8,28
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	1,66
Primärrohstoff	0,01
Savings Reusables	-2,92
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-28,84
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	-0,14

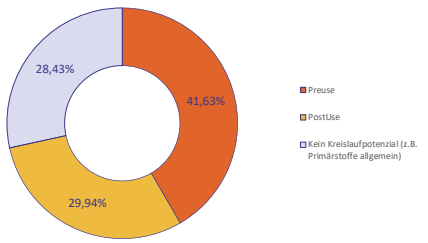
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

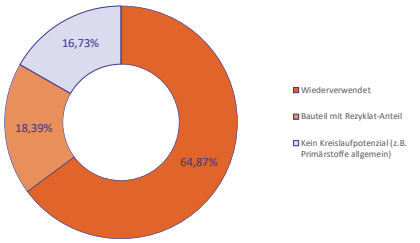
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Lehmputz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	56684,07886	3148,98	-54,00 €	-3.060,94 €	-0,16 €
Reapor	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	31491,15492	3148,98	-54,00 €	-1.700,52 €	-0,09 €
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	633,18	3148,98	-54,00 €	-34,19 €	0,00 €
ReZiegel	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1587154,21	3148,98	-20,00 €	-31.743,08 €	-1,68 €
Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	41515,03	3148,98	-54,00 €	-2.241,81 €	-0,12 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1602942,38	3180,31	-33,00 €	-52.897,10 €	-2,80 €

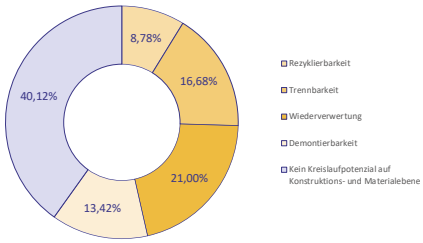
Variante 2

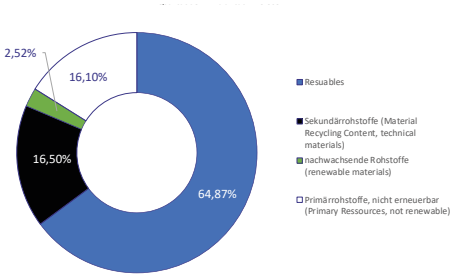
Übersicht Boden

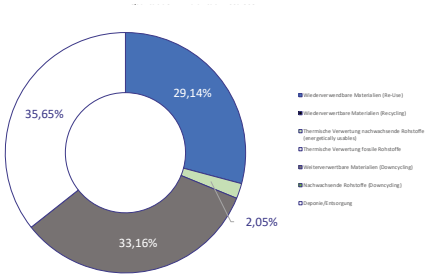
CPX







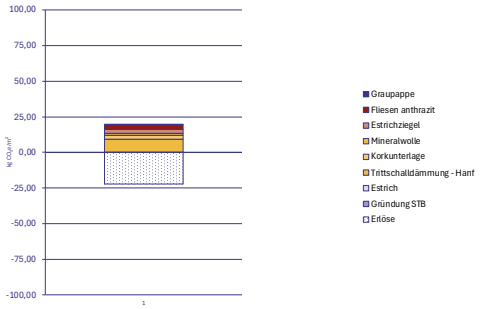


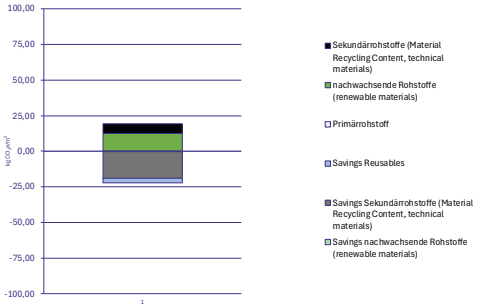


382

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Graupappe	0,07	835,25	0,83	0,06	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,03	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,01	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	lose	1,00	0,30	0,02	0,46	0,03
Fliesen anthrazit	7,15	89288,38	0,91	6,47	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	3,57	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	1,07	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	1,07	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	1,50	lose	1,00	0,30	2,14	0,41	2,90
Estrichziegel	102,64	1282046,07	0,68	69,79	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,25	25,66	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	15,40	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	20,53	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	21,55	lose	1,00	0,30	30,79	0,43	44,13
Mineralwolle	2,60	32426,55	0,71	1,84	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	0,97	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	0,13	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,39	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,55	Durchsteckmontage	0,85	0,26	0,66	0,33	0,86
Korkunterlage	5,47	68375,79	0,83	4,54	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	2,05	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	1,09	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	1,09	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,15	lose	1,00	0,30	1,64	0,46	2,49
Trittschalldämmung - Hanf	2,60	32478,50	0,68	1,76	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,98	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,52	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,39	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,55	verklebt	0,15	0,05	0,12	0,30	0,79
Estrich	26,47	330627,51	0,86	22,63	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	13,23	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	1,32	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	3,97	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	5,56	lose	1,00	0,30	7,94	0,36	9,40
Gründung STB	175,77	2195555,71	0,71	123,92	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	87,89	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	8,79	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	26,37	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	36,91	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	36,03

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,20	0,17	0,00	0,03	-0,07	0,17
Fliesen anthrazit	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	3,04	3,01	0,00	0,03	-0,07	0,81
Estrichziegel	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170101 Beton	2,65	2,53	0,00	0,12	-0,50	10,31
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170604 Dämmstoffe	1,30	1,28	0,00	0,02	-0,04	7,84
Korkunterlage	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	2,96	-5,82	0,00	8,78	-1,71	0,00
Trittschalldämmung - Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	9,15	3,99	0,00	5,16	-1,31	0,00
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44
Gründung STB	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,59

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	6,99
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	12,31
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-3,03
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-18,96
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	-0,17

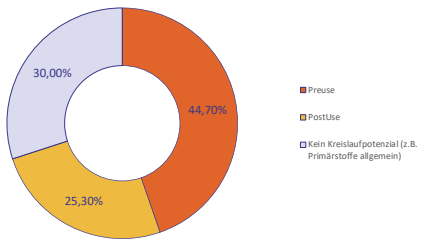
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

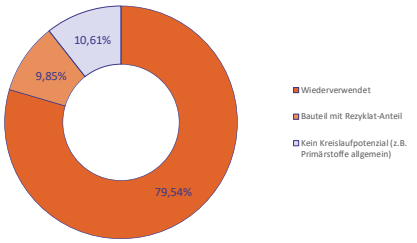
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	835,2514742	4176,26	-54,00 €	-45,10 €	0,00 €
Fliesen anthrazit	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	89288,38259	4176,26	-37,00 €	-3.303,67 €	-0,10 €
Estrichziegel	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	1282046,066	4176,26	-33,00 €	-42.307,52 €	-1,25 €
Mineralwolle	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	32426,55303	4176,26	-1.496,00 €	-48.510,12 €	-1,43 €
Korkunterlage	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	68375,79016	4176,26	-54,00 €	-3.692,29 €	-0,11 €
Trittschalldämmung - Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	32478,50033	4176,26	-54,00 €	-1.753,84 €	-0,05 €
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	330627,5085	4408,37	-33,00 €	-10.910,71 €	-0,32 €
Gründung STB	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2195555,715	4356,27	-33,00 €	-72.453,34 €	-2,14 €

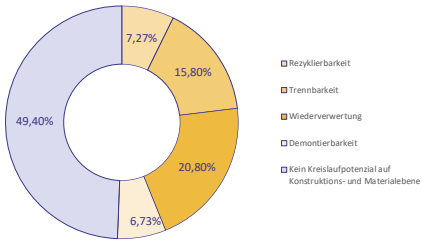
Variante 2

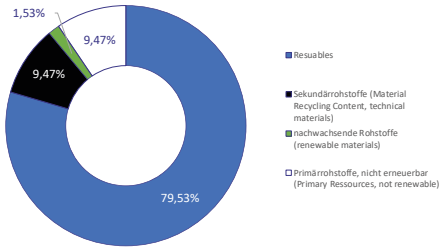
Übersicht Decke

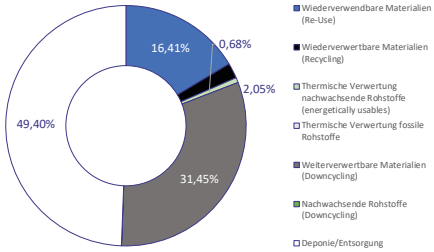
CPX







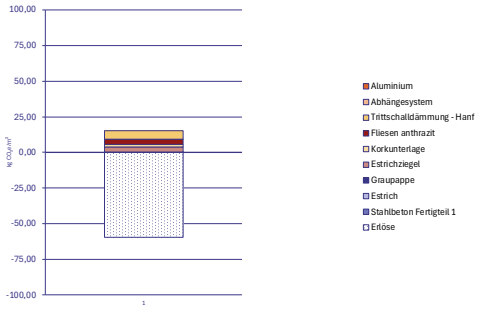


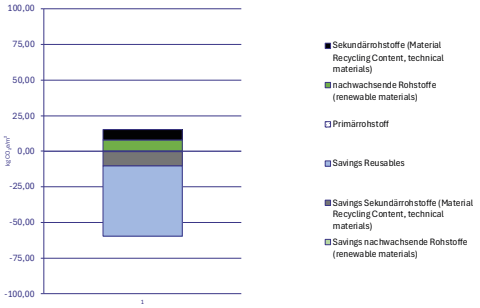


384

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Aluminium	0,43	5348,94	0,98	0,42	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,21	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	0,06	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,09	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	0,13	lose	1,00	0,30	0,13	0,48	0,20
Abhängesystem	0,06	769,39	0,86	0,05	Wiederverwendet	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1,00	0,50	0,03	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle	1,00	0,20	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,02	0,36	0,02
Trittschalldämmung - Hanf	1,63	20382,83	0,81	1,31	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,61	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,33	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,24	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,34	lose	1,00	0,30	0,49	0,43	0,70
Fliesen anthrazit	9,18	114680,21	0,88	8,08	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	4,59	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	0,92	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	1,38	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,93	lose	1,00	0,30	2,75	0,38	3,49
Korkunterlage	3,44	42911,21	0,12	0,42	Primärrohstoff	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,00	0,00	0,00	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,69	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,15	0,12	0,42
Estrichziegel	64,41	804585,20	0,68	43,80	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,25	16,10	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	0,75	0,15	9,66	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	12,88	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	13,53	lose	1,00	0,30	19,32	0,43	27,70
Graupappe	0,09	1072,78	0,81	0,07	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,03	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,02	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,02	lose	1,00	0,30	0,03	0,43	0,04
Estrich	40,27	503011,06	0,71	28,39	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	20,13	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	2,01	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	6,04	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	8,46	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	8,26
Stahlbeton Fertigteil 1	220,58	2755316,02	0,71	155,51	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	110,29	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	11,03	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	33,09	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	46,32	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	45,22

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,61
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66
Trittschalldämmung - Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	5,74	2,50	0,00	3,24	-0,82	0,00
Fliesen anthrazit	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170107 Gemisch: Ziegel, Fliesen, Keramik	3,90	3,85	0,00	0,04	-0,09	1,05
Korkunterlage	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	1,86	-3,65	0,00	5,51	-1,07	0,00
Estrichziegel	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170101 Beton	3,39	3,23	0,00	0,15	-0,64	9,23
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,26	0,21	0,00	0,04	-0,09	0,17
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,86

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	7,29
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	7,86
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-49,22
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-10,28
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	-0,17

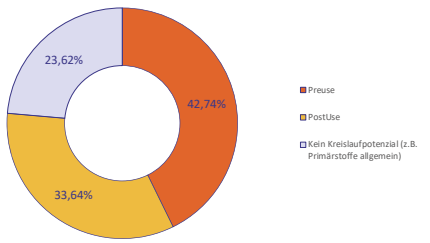
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

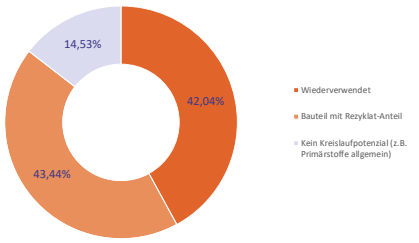
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	5348,944516	5348,83	270,00 €	1.444,22 €	0,03 €
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	769,390842	769,33	270,00 €	207,74 €	0,00 €
Trittschalldämmung - Hanf	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	20382,82513	5348,83	-54,00 €	-1.100,67 €	-0,02 €
Fliesen anthrazit	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	114680,2106	5348,83	-37,00 €	-4.243,17 €	-0,10 €
Korkunterlage	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	42911,2108	5348,83	-54,00 €	-2.317,21 €	-0,05 €
Estrichziegel	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	804585,2025	5348,83	-33,00 €	-26.551,31 €	-0,60 €
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1072,780267	5348,83	-54,00 €	-57,93 €	0,00 €
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	503011,0605	6181,50	-33,00 €	-16.599,36 €	-0,37 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2755316,02	5467,1	-33,00 €	-90.925,43 €	-2,04 €

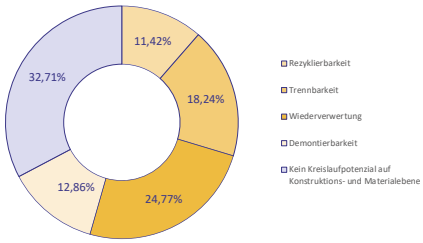
Variante 2

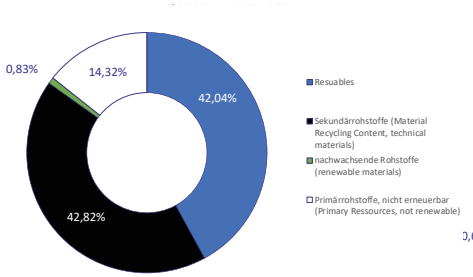
Übersicht Dach

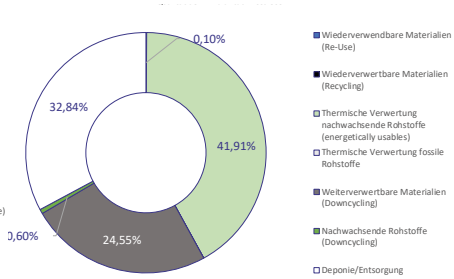
CPX







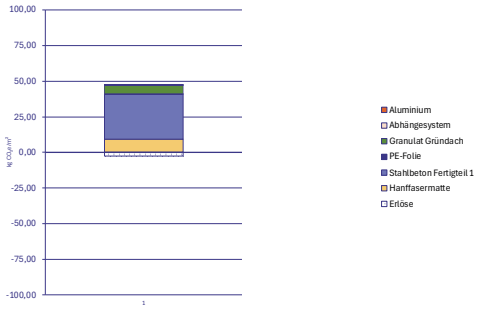


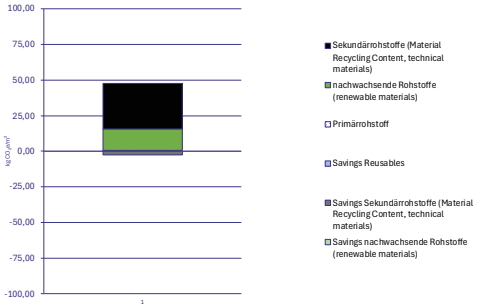


386

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Aluminium	0,33	4097,82	0,98	0,32	Wiederverwendet	Wiederverwendet	1,00	0,50	0,16	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	0,75	0,15	0,05	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,07	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	0,10	lose	1,00	0,30	0,10	0,48	0,16
Abhängesystem	0,05	660,10	0,83	0,04	Wiederverwendet	Wiederverwendet	1,00	0,50	0,03	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,01	0,33	0,02
Granulat Gründach	131,64	1644264,69	1,00	131,64	Wiederverwendet	Wiederverwendet	1,00	0,50	65,82	kompostierbar	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	1,00	0,20	26,33	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	26,33	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	39,49	lose	1,00	0,30	39,49	0,50	65,82
PE-Folie	0,14	1777,58	0,02	0,00	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	0-25% Anteil an Abfall der recycled wird	0,00	0,00	0,00	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,01	0,02	0,00
Stahlbeton Fertigteil 1	179,31	2239755,13	0,59	105,79	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	0,75	0,38	67,24	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	8,97	Maschinelle Trennung mit tragbaren Geräten (Handwerkz	0,85	0,17	30,48	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	37,65	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,22	38,55
Hanffasermatte	2,59	32400,42	0,93	2,41	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,97	kompostierbar	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	1,00	0,20	0,52	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,39	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,54	lose	1,00	0,30	0,78	0,43	1,12

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Aluminium	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170407 Metall	0,33	0,26	0,00	0,07	-0,30	2,26
Abhängesystem	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170407 Metall	0,05	0,04	0,00	0,01	-0,05	0,52
Granulat Gründach	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170504 Boden	5,62	4,61	0,00	1,02	-0,19	0,00
PE-Folie	Primärrohstoff	170203 Kunststoffe, gemischt	0,72	0,32	0,00	0,40	-0,17	0,00
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	170101 Beton	31,59	30,26	0,00	1,32	-0,25	0,00
Hanffasermatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	9,13	3,98	0,00	5,15	-1,30	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	31,97
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	14,75
Primärrohstoff	0,72
Savings Reusables	0,00
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-2,77
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

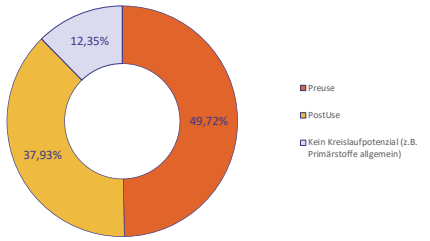
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

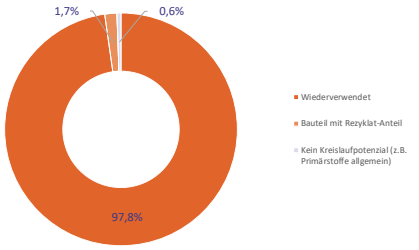
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Aluminium	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	4097,823628	4097,78	270,00 €	1.106,41 €	0,03 €
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	660,103103	659,90	270,00 €	178,23 €	0,01 €
Granulat Gründach	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1644264,686	8887,94	-33,00 €	-54.260,73 €	-1,53 €
PE-Folie	Primärrohstoff	1777,58344	8887,94	1.895,00 €	3.368,52 €	0,09 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	2239755,134	4443,97	-33,00 €	-73.911,92 €	-2,08 €
Hanffasermatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	32400,41903	8526,44	-54,00 €	-1.749,62 €	-0,05 €

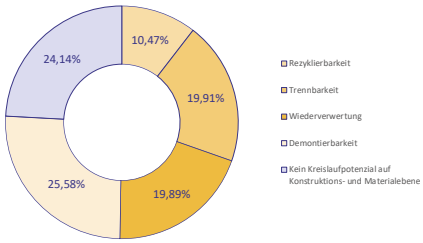
Variante 3

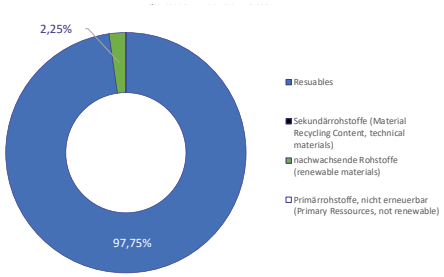
Übersicht Außenwand

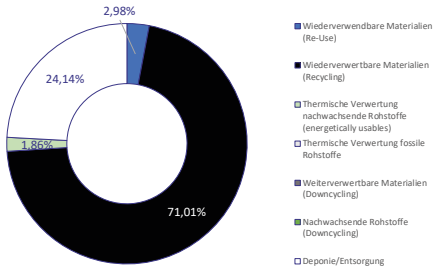
CPX







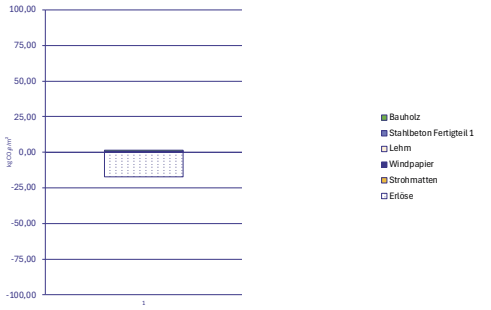




388

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Laubholzfassade (Bauholz)	5,22	65228,97	0,80	4,19	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	2,61	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	0,78	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	1,04	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	1,33	0,30	1,58
Stahlbeton Fertigteil 1	98,33	1228286,93	0,88	86,78	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	49,17	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,50	0,10	9,83	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle	1,00	0,20	19,67	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	20,65	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	25,08	0,38	37,61
Lehm	1,98	24722,93	0,81	1,59	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1,00	0,50	0,99	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,40	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,30	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,42	lose	1,00	0,30	0,59	0,43	0,85
Windpapier	0,03	416,77	0,96	0,03	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	0,01	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,01	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,01	Einfache Aufbereitung notwendig (z.B. Anstrich)	0,90	0,27	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,01	0,46	0,02
Strohmatten	0,37	4584,45	0,70	0,26	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1,00	0,50	0,18	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,07	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,07	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,09	0,33	0,12

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Bauholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A1	0,89	-7,74	0,00	8,63	-0,14	0,00
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,32
Lehm	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,35	0,09	0,00	0,26	0,00	0,00
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,17	0,08	0,00	0,09	-0,04	0,00
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,29	-0,19	0,00	0,48	0,00	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	10,79
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	4,19
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-3,19
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	-21,62
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

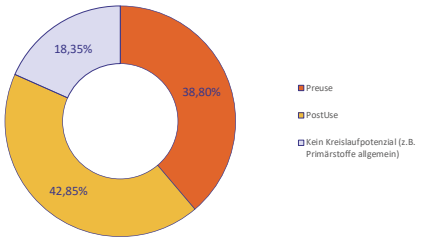
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

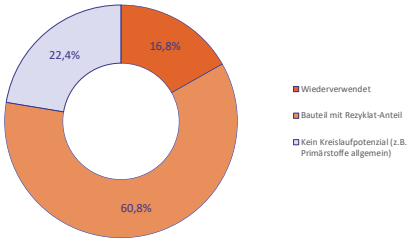
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Bauholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	65228,96815	1765,92	-58,00 €	-3.783,28 €	-0,37 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1228286,93	2437,07	-33,00 €	-40.533,47 €	-4,00 €
Lehm	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	24722,92607	1765,92	-54,00 €	-1.335,04 €	-0,13 €
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	416,7685602	2083,84	-54,00 €	-22,51 €	0,00 €
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	4584,454162	2083,84	-54,00 €	-247,56 €	-0,02 €

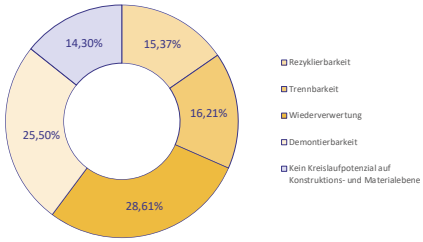
Variante 3

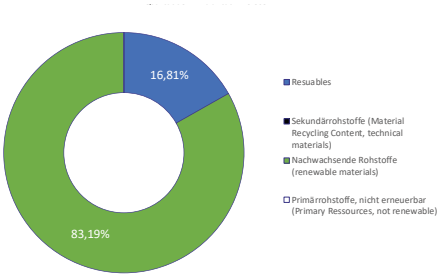
Übersicht Außenwand Holz

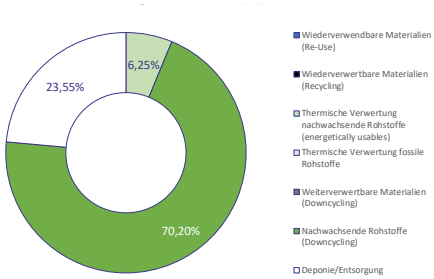
CPX











390

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Brettschicht holz	47,48	593064,42	0,80	38,10	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	17,80	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	7,12	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	7,12	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	14,24	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	12,11	0,43	20,30
Lehmbauplatte	3,99	49895,45	0,68	2,73	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	1,00	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically	1,00	0,20	0,80	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle	1,00	0,20	0,80	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,84	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	1,02	0,43	1,73
Windpapier	0,06	712,79	0,81	0,05	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,02	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,01	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	lose	1,00	0,30	0,02	0,43	0,02
ReUse-Holzfassade	10,54	131644,15	0,94	9,88	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	5,27	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	1,58	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	2,11	Einfache Aufbereitung notwendig (z.B. Anstrich)	0,90	0,27	2,85	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	2,69	0,44	4,61
Strohmatten	0,63	7840,71	0,70	0,44	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,24	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,13	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,13	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,16	0,33	0,21

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	14,74	-62,56	0,00	77,30	-1,21	0,00
Lehmbauplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,70	0,18	0,00	0,52	-0,01	0,00
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,29	0,13	0,00	0,16	-0,07	0,00
ReUse-Holzfassade	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A1	1,79	-15,63	0,00	17,42	-0,29	0,00
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,49	-0,33	0,00	0,82	0,00	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	18,01
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	0,00
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

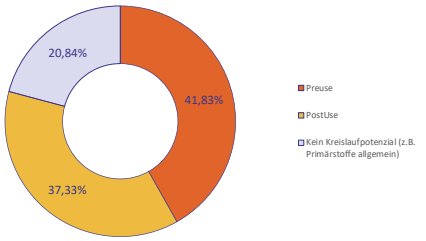
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

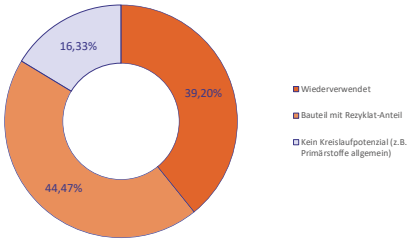
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	593064,4203	3563,96	-72,00 €	-42.700,64 €	-2,40 €
Lehmbauplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	49895,44633	3563,96	-54,00 €	-2.694,35 €	-0,15 €
Windpapier	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	712,7920904	3563,96	-54,00 €	-38,49 €	0,00 €
ReUse-Holzfassade	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	131644,1456	3563,96	-58,00 €	-7.635,36 €	-0,43 €
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	7840,712994	3563,96	-54,00 €	-423,40 €	-0,02 €

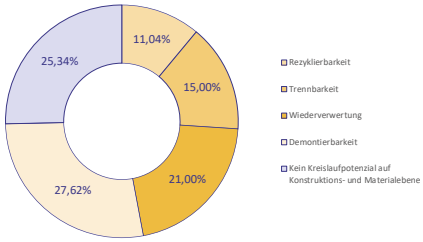
Variante 3

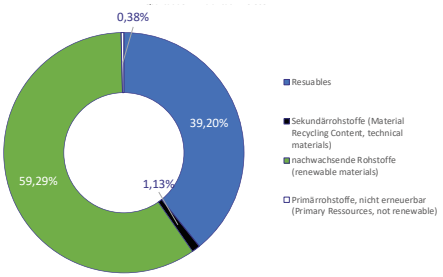
Übersicht Boden

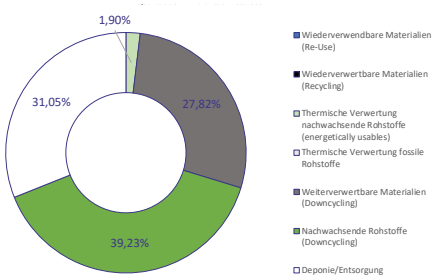
CPX







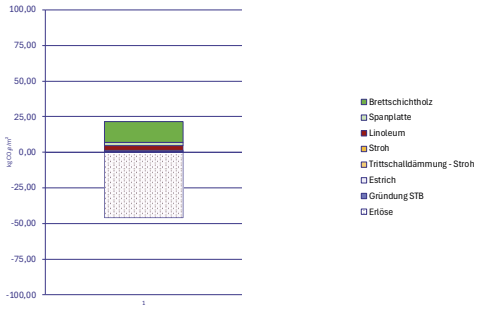


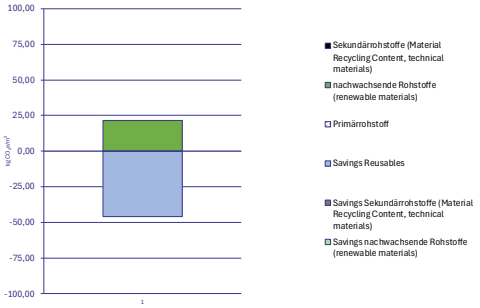


392

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Brettschicht holz	46,89	585644,10	0,76	35,52	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	17,58	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	7,03	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	7,03	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	9,85	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	11,96	0,38	17,93
Spanplatte	4,04	50479,20	0,66	2,65	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	1,01	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	0,61	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	0,61	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	0,85	lose	1,00	0,30	1,21	0,41	1,64
Linoleum	1,35	16826,40	0,73	0,98	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	0,75	0,38	0,51	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,07	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,20	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,28	lose	1,00	0,30	0,40	0,36	0,48
Stroh	0,99	12309,29	0,81	0,79	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,37	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,20	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,15	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,21	lose	1,00	0,30	0,30	0,43	0,42
Trittschalldämmung - Stroh	0,99	12369,43	0,81	0,80	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,37	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,20	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,15	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,21	lose	1,00	0,30	0,30	0,43	0,43
Estrich	34,94	436431,08	0,86	29,87	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	17,47	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	1,75	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	5,24	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	7,34	lose	1,00	0,30	10,48	0,36	12,40
Stahlbeton Fertigteil 1	0,04	504,03	0,71	0,03	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,02	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	0,01
Brettschicht holz	46,89	585644,10	0,76	35,52	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	17,58	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	7,03	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	7,03	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	9,85	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	11,96	0,38	17,93

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	14,56	-61,78	0,00	76,33	-1,19	0,00
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	2,32	-4,31	0,00	6,62	-0,10	0,00
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	3,17	1,67	0,00	1,50	-0,65	0,00
Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,77	-0,52	0,00	1,28	0,00	0,00
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,77	-0,52	0,00	1,29	0,00	0,00
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,41
Gründung STB	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,62

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	21,58
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-46,03
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

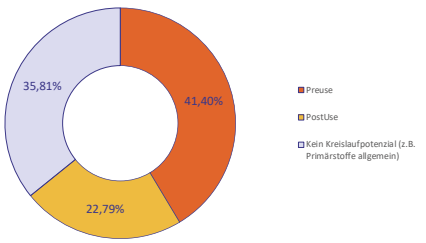
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

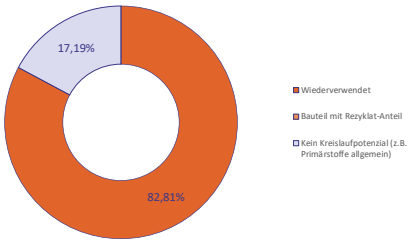
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	585644,0998	5608,84	-72,00 €	-42.166,38 €	-1,06 €
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	50479,20084	5608,84	-72,00 €	-3.634,50 €	-0,09 €
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	16826,40028	5608,84	-54,00 €	-908,63 €	-0,02 €
Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	12309,28546	5608,84	-54,00 €	-664,70 €	-0,02 €
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	12369,43495	5608,84	-54,00 €	-667,95 €	-0,02 €
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	436431,0795	5854,8	-33,00 €	-14.402,23 €	-0,36 €
Gründung STB	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2950819,612	5854,8	-33,00 €	-97.377,05 €	-2,45 €

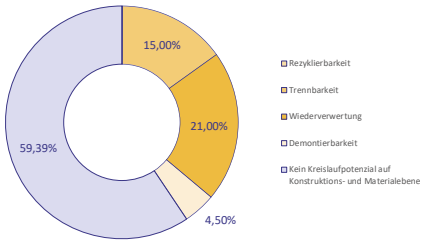
Variante 3

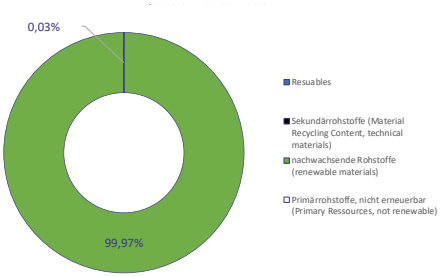
Übersicht Decke

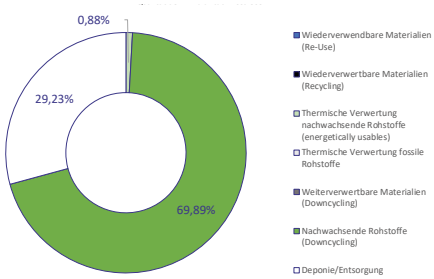
CPX







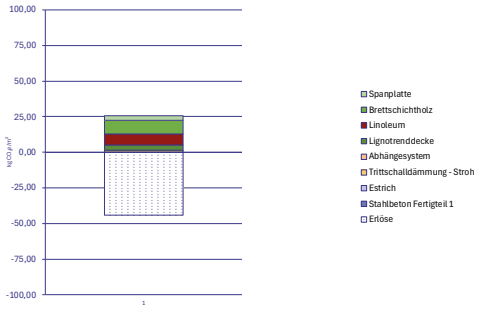


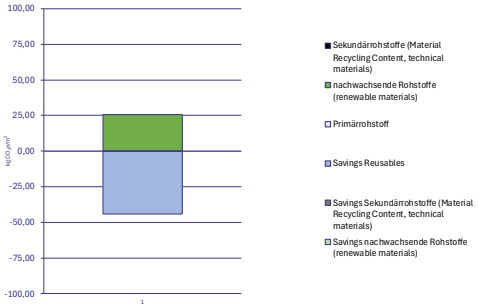


394

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Spanplatte	4,92	61419,06	0,66	3,22	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	1,23	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	0,74	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,74	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,03	lose	1,00	0,30	1,48	0,41	1,99
Brettschicht holz	31,36	391687,31	0,76	23,75	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	11,76	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	4,70	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	4,70	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	6,59	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	8,00	0,38	11,99
Linoleum	1,12	13958,88	0,76	0,84	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,42	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,50	0,10	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,17	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,23	lose	1,00	0,30	0,34	0,38	0,42
Lignotrenddecke	14,77	184512,10	0,63	9,34	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	3,69	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	2,22	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	2,22	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	3,10	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	3,77	0,38	5,65
Abhängesystem	0,10	1199,75	0,86	0,08	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,05	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,02	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,02	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,02	0,36	0,03
Trittschalldämmung - Stroh	1,64	20473,02	0,81	1,32	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,61	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,33	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,25	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,34	lose	1,00	0,30	0,49	0,43	0,70
Estrich	42,89	535686,00	0,71	30,23	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	21,44	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	2,14	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	6,43	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	9,01	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	8,79
Stahlbeton Fertigteil 1	216,15	2699912,97	0,71	152,38	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	108,07	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	10,81	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	32,42	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	45,39	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	44,31

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e) /m2	GWP B4 (kg CO_2e)/ m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/ m2	GWP D (kg CO_2e)/ m2	Erlöse (kg CO_2e)/ m2
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	2,82	-5,24	0,00	8,06	-0,12	0,00
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	9,74	-41,32	0,00	51,05	-0,80	0,00
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	7,97	4,20	0,00	3,78	-1,64	0,00
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A1	3,68	-15,61	0,00	19,29	-0,30	0,00
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	1,28	-0,86	0,00	2,13	0,00	0,00
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,42
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170101 Beton	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/ m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	25,48
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-44,33
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

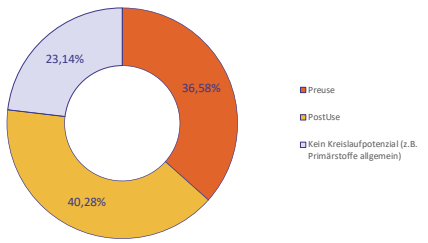
VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

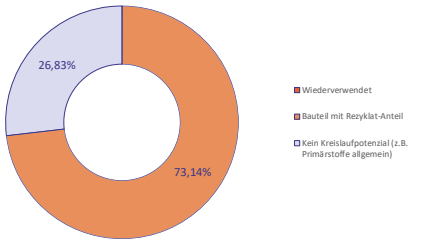
Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	61419,06048	4652,94	-72,00 €	-4.422,17 €	-0,11 €
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	391687,308	4652,94	-72,00 €	-28.201,49 €	-0,72 €
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	13958,87738	4652,94	-54,00 €	-753,78 €	-0,02 €
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	184512,1023	7502	-58,00 €	-10.701,70 €	-0,27 €
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1199,748133	1199,65	270,00 €	323,93 €	0,01 €
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	20473,02016	4652,94	-54,00 €	-1.105,54 €	-0,03 €
Estrich	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	535685,9985	6555,45	-33,00 €	-17.677,64 €	-0,45 €
Stahlbeton Fertigteil 1	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	2699912,966	5357,14	-33,00 €	-89.097,13 €	-2,27 €

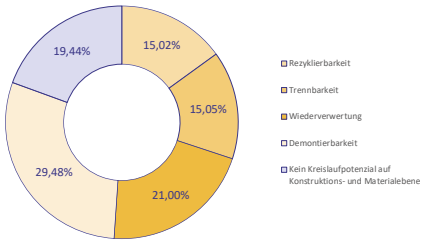
Variante 3

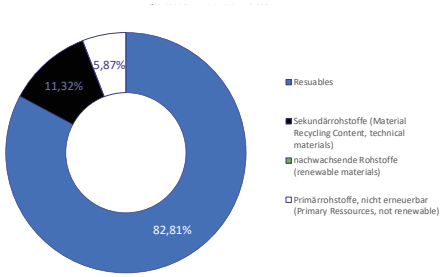
Übersicht Decke Holz

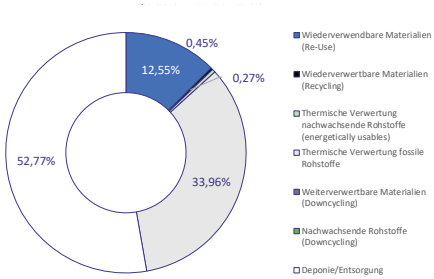
CPX







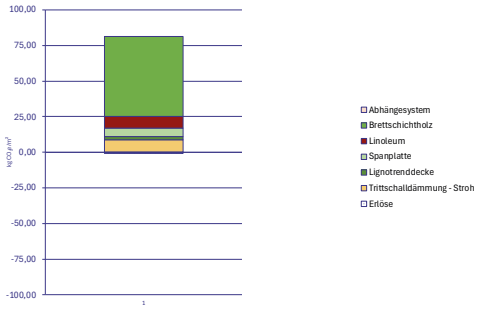


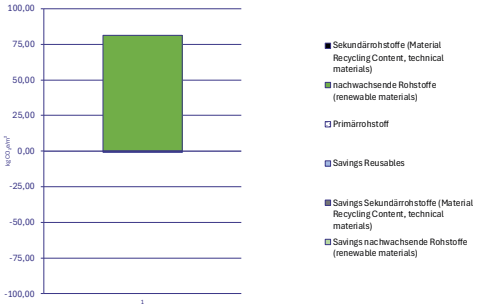


396

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Spanplatte	4,92	61419,06	0,66	3,22	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	1,23	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	0,74	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,74	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	1,03	lose	1,00	0,30	1,48	0,41	1,99
Brettschicht holz	31,36	391687,31	0,76	23,75	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	11,76	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	4,70	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	4,70	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	6,59	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	8,00	0,38	11,99
Linoleum	1,12	13958,88	0,76	0,84	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,42	50-75% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,50	0,10	0,11	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,17	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,23	lose	1,00	0,30	0,34	0,38	0,42
Lignotrenddecke	14,77	184512,10	0,63	9,34	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	3,69	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	2,22	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	2,22	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	3,10	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	3,77	0,38	5,65
Abhängesystem	0,10	1199,75	0,86	0,08	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	0,05	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	0,02	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,02	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,02	0,36	0,03
Trittschalldämmung - Stroh	1,64	20473,02	0,81	1,32	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	0,61	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	0,33	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,25	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,34	lose	1,00	0,30	0,49	0,43	0,70
Estrich	42,89	535686,00	0,71	30,23	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	21,44	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	2,14	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	6,43	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	9,01	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	8,79
Stahlbeton Fertigteil 1	216,15	2699912,97	0,71	152,38	Wiederverwendet	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	1,00	0,50	108,07	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Weiterverwertbare Materialien (Downcycling)	0,25	0,05	10,81	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	32,42	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	45,39	einbetoniert	0,00	0,00	0,00	0,21	44,31

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	56,28	-238,83	0,00	295,11	-4,62	0,00
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	7,97	4,20	0,00	3,78	-1,64	0,00
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	5,74	-10,66	0,00	16,40	-0,25	0,00
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A1	2,60	-1,75	0,00	4,34	-0,01	0,00
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	-1,75	0,00	4,34	4,34	-0,01	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	81,27
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-0,63
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	727,801944	727,53	270,00 €	196,51 €	0,00 €
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	2264108,503	17373,6	-72,00 €	-163.015,81 €	-2,55 €
Linoleum	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	28410,11913	9470,04	-54,00 €	-1.534,15 €	-0,02 €
Spanplatte	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	125004,5242	9470,04	-72,00 €	-9.000,33 €	-0,14 €
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	195291,615	7940,34	-58,00 €	-11.326,91 €	-0,18 €
Trittschalldämmung - Stroh	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	41668,17473	18940,08	-54,00 €	-2.250,08 €	-0,04 €

Variante 3

Übersicht Dach

CPX



398

Name	kg/m2	Massen (kg)	CPX gesamt %	CPX gesamt kg/m2	Material-herkunft	Stoffstrom	CPX-Faktor	PreUse %	PreUse M%	Rezyklier-barkeit	Stoffstrom	CPX-Faktor	Rezyk %	Rezyk M%	Trennbar-keit	CPX-Faktor	Sepera %	Sepera M%	Wiederverwendbar-keit	CPX-Faktor	Reuse %	Reuse M%	Demontierbar-keit	CPX-Faktor	Demont %	Demont M%	PostUse %	PostUse M%
Gründach Granulat	166,18	2075785,88	1,00	166,18	Wiederverwendet	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1,00	0,50	83,09	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	33,24	Kein Werkzeug notwendig oder keine maschinelle Trennung	1,00	0,20	33,24	Direkt einsetz- bzw. wiederverwendbar	1,00	0,30	49,85	lose	1,00	0,30	49,85	0,50	83,09
Lignotrendd ecke	10,28	128427,55	0,63	6,50	Bauteil mit Rezyklat-Anteil bis zu 50%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,50	0,25	2,57	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	1,54	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen	0,75	0,15	1,54	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch	0,70	0,21	2,16	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	2,62	0,38	3,93
Brettschicht holz	31,89	398300,67	0,76	24,15	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	11,96	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,75	0,15	4,78	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	4,78	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	6,70	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	8,13	0,38	12,20
Abhängesys tem	0,05	654,69	0,83	0,04	Wiederverwendet	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	1,00	0,50	0,03	25-50% Anteil an Abfall der recycled wird	Nachwachsende Rohstoffe (Downcycling)	0,25	0,05	0,00	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	0,01	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	0,01	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	0,01	0,33	0,02
Graupappe	0,18	2244,09	0,10	0,02	Primärrohstoff	Primärrohstoff	0,00	0,00	0,00	75-100% Anteil an Abfall der recycled wird	Thermische Verwertung fossile Rohstoffe	0,75	0,15	0,03	Verlustfreie Trennung unmöglich	0,00	0,00	0,00	Wiederverwendung ökonomisch nicht tragbar	0,00	0,00	0,00	verklebt	0,15	0,05	0,01	0,10	0,02
Strohmatten	24685,	2,20	0,78	19316,	Bauteil mit Rezyklat-Anteil von 50-100%	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	0,75	0,38	9256,88	kompostierbar	Thermische Verwertung nachwachsende Rohstoffe (energetically usables)	1,00	0,20	4937,0	Maschinelle Trennung mit fest verbauten Maschinen (im Werk)	0,75	0,15	3702,75	Professionelle technische Aufbereitung notwendig (z.B. durch Herstellerfirma)	0,70	0,21	5183,85	an- oder aufgeschraubt	0,85	0,26	6294,68	0,41	10059,15

GWP





Name	Stoffstrom	Entsorgungskategorie	GWP total	GWP A1-A3 (kg CO_2e)/m2	GWP B4 (kg CO_2e)/m2	GWP C3-C4 (kg CO_2e)/m2	GWP D (kg CO_2e)/m2	Erlöse (kg CO_2e)/m2
Gründach Granulat	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170504 Boden	7,10	5,81	0,00	1,29	-0,24	0,00
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A1	3,19	-13,55	0,00	16,74	-0,26	0,00
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	170201 Holz A2	9,90	-42,02	0,00	51,92	-0,81	0,00
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	170407 Metall	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	0,90	0,40	0,00	0,50	-0,22	0,00
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	nnnnnn biologische Faserstoffe, kompostierbar	1,54	-1,03	0,00	2,57	0,00	0,00

Stoffstrom	GWP total (kg CO_2e)/m2
Reusables	0,00
Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	22,64
Primärrohstoff	0,00
Savings Reusables	-0,56
Savings Sekundärrohstoffe (Material Recycling Content, technical materials)	0,00
Savings nachwachsende Rohstoffe (renewable materials)	0,00

VERWERTUNGSKOSTEN UND -ERLÖSE

Name	Stoffstrom	Masse gesamt (kg)	Flächen (m2)	Verwertungskosten / -erlöse [€/t]	Verwertungskosten / -erlöse [€/gesamt]	[€/m2]
Gründach Granulat	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	2075785,884	11220,48	-33,00 €	-68.500,93 €	-1,52 €
Lignotrenddecke	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	128427,5534	5221,69	-58,00 €	-7.448,80 €	-0,16 €
Brettschichtholz	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	398300,672	5610,24	-72,00 €	-28.677,65 €	-0,64 €
Abhängesystem	wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	654,692879	654,46	270,00 €	176,77 €	0,00 €
Graupappe	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	2244,09284	11220,48	-54,00 €	-121,18 €	0,00 €
Strohmatten	Erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	24685,02124	11220,48	-54,00 €	-1.332,99 €	-0,03 €

QUELLEN

Aesthetica. (2016). Aesthetica. Von https://aestheticamagazine.com/gordon-matta-clark-anarchitecture/ abgerufen am 06.03.2025

AgwA. (2018). AgwA. Von https://www.agwa.be/en/projects/1811_KARREVELD/212/ abgerufen am 28.03.2025

Albori. (2008). Albori. Von https://www.albori.it/wp-content/uploads/2013/02/album-ecomostro-addomesticato.pdf abgerufen am 06.03.2025

Arup. (2016). The Circular Building. Von https://www.arup.com
Ellen MacArthur Foundation. (2021). Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. abgerufen am 06.03.2025

Baunetzwissen. (2025). Baunetzwissen. Von https://www.baunetzwissen.de/flachdach/objekte/wohnen-mfh/ehemaliges-fabrikgebaeude-haus-anton-in-eindhoven-3464499 abgerufen am 06.03.2025

BKI Baukosten Online. (2025). BKI Baukosten Online. Von https://baupreise-online.bki.de/Bpk/Trades/1e83088a-5410-458c-a5ed-b13a7b337800 abgerufen

Brand, S. (1997). How buildings learn: what happens after they’re built. London: Phoenix.

Building Circularity Index. (2022). Design for Disassembly in Practice. Amsterdam: Metabolic.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung . (2024). BBSR. Von https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2024/suffizienz-forschung-gebaeudebereich-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2 abgerufen am 17.05.2025

Circular Thinking in Standards. (08 2024). DIN. Von https://www.din.de/resource/blob/1141716/68697f6cf90d91b28c585260d730d02e/circular-thinking-in-standards-data.pdf abgerufenam 18.05.2025

Concular. (06. 03 2025). Concular. Von https://concular.de abgerufen
Concular für Planende. (2025). Concular. Von https://concular.de/concular-fuer-

planende/?utm_source=chatgpt.com abgerufen am 15.06.2025

Dall, A., & Pereira, S. (2024). Material Cultures: Material Reform. Großbritannien: Mack Books.

dena - Gebäudeforum Klimaneutral. (kein Datum). dena - Gebäudeforum Klimaneutral. Von https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/231212_dena_BR_Studie_Kreislaufwirtschaft_Bauwesen_E5-FINAL.pdf abgerufen am 10.06.2025

DeutschlandBauteilnetz. (03 2025). Von https://www.bauteilnetz.de/bauteilnetz/website/stdws_adresse/bauteilboersen/berlin-brand.html abgerufen am 05.05.2025

DGNB System - Kriterienkatalog Sanierung. (2021). DGNB. Von https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/kriterien/dgnb-kriterium-tec1-6-gebaeude-sanierung-version-2021.pdf abgerufen am 15.05.2025

diederendirrix. (2014). diederendirrix. Von https://www.diederendirrix.nl/en/projecten/building-anton/ abgerufen am 02.05.2025

Digitaler Gebäuderessourcenpass. (2025). Concular. Von https://concular.de/digitaler-gebauderessourcenpass/?utm_source=chatgpt.com abgerufen am 10.06.2025

DIN - kurz erklärt. (06. 03 2025). DIN. Von https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/basiswissen abgerufen am 03.06.2025

DIN, DKE, & VDI. (06. 03 2025). DIN. Von https://www.din.de/resource/blob/892606/06b0b608640aaddd63e5dae105ca77d8/normungsroadmap-circular-economy-data.pdf abgerufen am 03.06.2025

Divisare. (2011). Divisare. Von https://divisare.com/projects/154154-studio-albori-ecomostro-addomesticato abgerufenam 06.03.2025

Gebäuderessourcenpass. (07 2024). DGNB. Von https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass abgerufen am 10.06.2025

Goerke, A., Braus, C., Campanella, D., Schäufele, J., Hildebrand, L., Steinlein, R., . . . Fehse, L. (2025). Concular. Von https://concular.de/wp-content/uploads/2024/12/2024_Concular_Handlungsempfehlung_oeffentliche_Hand_Wiederverwendung.pdf abgerufen 06.03.2025

GXN Innovation. (2020). Circle House: Demonstrating Circular Building.

Higgott, A. (2002). Building the Crystal Palace: The Architecture of the Great Exhibition of 1851. Yale University Press.

Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A., & Seggwies, J.-K. (2021). Recycling Atlas.

Holschemacher, K. (2015). Entwurfs- und Konstruktionstafeln für Architekten. Berlin: Beuth.

IHK. (2020). Von https://www.ihk.de/lippe-detmold/share/flipping-book/4859684/flippingbook.pdf?utm_source=chatgpt.com abgerufen 06.03.2025

Kibert, C. J. (2016). Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery (4th ed.). Wiley.

Kreislaufwirtschaftsgesetz. (2024). Von https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/ abgerufen am 15.05.2025

Lammers, J. (11 2021). Opus4. Von https://opus4.kobv.de/opus4-udk/frontdoor/deliver/index/docId/2169/file/TGiWB_231121_lammers_Acmyk.pdf abgerufen am 10.05.2025
Ministerium für Heimat. (2020). Ministerium für Heimat. Von https://www.aknw.de/fileadmin/user_upload/News-PDFs/2020/11-2020/SchulBauR_2020_einschliesslich_Erlaeuterungen.pdf abgerufen am 06.03.2025

Ministerium für Umwelt, NRW. (2025). Von https://www.umwelt.nrw.de/themen/umwelt/umwelt-und-ressourcenschutz/abfall-und-kreislaufwirtschaft/abfall-und abgerufen am 17.05.2025

Montagsstiftung Schulbauleitlinien. (2025). Montagsstiftung Schulbauleitlinien. Von https://www.montag-stiftungen.de/service/medien/leitlinien-fuer-leistungsfaehige-schulbauten-in-deutschland abgerufen am 17.05.2025

Notion Site Concular. (2025). Von https://concular.notion.site/IFC-Modellanforderungen-27ac3a4b5a1d469c8b9657d84ffced68#1586f0c6558c8080aa73c57579f58fc9 abgerufen am 15.06.2025

Open House Festival. (2017). Open House Festival. Von https://programme.openhouse.org.uk/listings/7607#:~:text=The%20Department%20Store%20is%20an,fabric%20of%20the%20heritage%20building. abgerufen am 06.03.2025

Prusicki, M. (2023). Domusweb. Von https://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2023/05/23/renzo-pianos-lingotto-project-turin---from-the-domus-archive.html abgerufen am 06.03.2025

Puttkamer, L. (2023). Baumeister. Von https://www.baumeister.de/karreveld-2-molenbeek-agwa/ abgerufen am am 06.03.2025

Rakhshan, K., Morel, J.-C., Alaka, H., & Charef, R. (2020). Components reuse in the building sector – A systematic review. Von https://www.researchgate.net/publication/339595196_Components_reuse_in_the_building_sector_-_A_systematic_review abgerufen am 15.06.2025

restado. (2025). Von https://restado.de/ueber-restado/ abgerufen am 15.05.2025

Rosen, A. (2021). Urban Mining Index - Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung.

RPBW. (2025). RPBW. Von https://www.rpbw.com/project/lingotto-factory-conversion abgerufen

Semper, G. (1989). The Four Elements of Architecture and Other Writings (H. Mallgrave & W. Herrmann, Eds.). Cambridge University Press. (Original work published 1851)

s. n. (1924). Die Einfahrbahn für Automobile über der Fabrik Fiat in Lingotto bei Turin. Schweizerische Bauzeitung, S. 137-138.

Shop Concular. (2025). Von https://shop.concular.de abgerufen am 06.03.2025

Stricker, E., Brandi, G., & Sonderegger, A. (2021). Bauteile wiederverwenden: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen. Zürich: Park Books AG.

Timber Development UK. (2019). Timber Development UK. Von https://timberdevelopment.uk/case-studies/the-department-store-brixton-london/ abgerufen am 08.06.2025

Umbau der ehemaligen Salzfabrik. (2020). Zollverein. Von https://www.zollverein.de/ueber-zollverein/aktuelle-entwicklung/ruhr-museum-zentral-und-schaudepot/ abgerufen am 15.06.2025

Understanding circularity. (06. 03 2025). UNEP circularity platform. Von https://buildingcircularity.org abgerufen am 06.03.2025

Vandamme, E. (2025). Protection & Renovation: Wood Circular Timber Design.

Von Ascheraden, A. (2019). Baublatt. Von https://www.baublatt.ch/baupraxis/fiat-fabrik-steilkurven-auf-dem-dach-der-legendaeren-lingotto-26631 abgerufen 17.05.2025

von Busch, M., Deimel, C., Hasler, E., Keilhacker, T., Müller, H.-S., Pischetsrieder, E., . . . Sichrovsky, M. (06. 03 2025). Gebäudeforum Klimaneutral. Von https://www.ak-berlin.de/fileadmin/user_upload/Fachthemen_Nachhaltiges_Planen_und_Bauen/20241028_A_WIE_ZIRKULAER_EIN_LEITFADEN_ZUM_PLANEN_UND_BAUEN_IM_KREISLAUF.pdf abgerufen am 06.03.2025

Wikipedia. (2024). Packard Automotive Plant. Retrieved June 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Packard_Automotive_Plant

Wong, L. (2017). Adaptive REUSE: Extending the Lives of Buildings. Basel: Birkhäuser. Wong, L. (2023). Adaptive Reuse in Architecture: A typological index. Berlin: Birkhäuser.

Zirkuläres Bauen. (06. 03 2025). Gebäudeforum Klimaneutral. Von https://www.gebaeudeforum.de/wissen/nachhaltiges-bauen-und-sanieren/zirkulaeres-bauen/#c9178 abgerufen am 12.05.2025

Zirkularitätsindizes. (05 2024). DGNB. Von https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/zirkularitaetsindizes-fuer-bauwerke abgerufenam 06.03.2025

Zwirner, D. (2019). David Zwirner. Von https://www.davidzwirner.com/news/2019/gordon-matta-clark-anarchitect abgerufen am 28.03.2025

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Master-Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Schlangen, den 16. Juni 2025



Christin Schäfers