

Markerless Motion Capture im Tanzfilm Clouded Mind

Bachelor Arbeit

Medienproduktion (B.A.) BPO 2018

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe

März 2026

Erstprüfer: Prof. Dipl.-Reg. Sebastian Grobler

Zweitprüfer: Jennifer Meier

Mirjam Bölts

Abstrakt

Die vorliegende Bachelorarbeit untersucht die Anwendung von Markerless Motion Capture in der Filmproduktion am Beispiel des Hybridfilms *Clouded Mind*. Ziel der Arbeit ist es, die Vorteile und Herausforderungen markerloser Motion-Capture-Systeme im Vergleich zu markerbasierten Verfahren zu untersuchen und deren Einsatz im Kontext einer Filmproduktion zu analysieren. Dazu werden zunächst die theoretischen Grundlagen von Motion Capture sowie die technische Entwicklung und Funktionsweise markerbasierter und markerloser Methoden erläutert. Darauf folgt ein Vergleich zwischen den beiden Systemen.

Im weiteren Teil der Bachelorarbeit wird die praktische Umsetzung im Filmprojekt *Clouded Mind* untersucht. Dabei wird der Einsatz des Systems Captury Live im Rahmen der Hybridproduktion analysiert – von der Vorbereitung und Durchführung der Dreharbeiten bis hin zur Nachbearbeitung der erfassten Bewegungsdaten. Anhand ausgewählter Szenen wird untersucht, inwiefern sich die im theoretischen Vergleich zu markerbasierten Methoden herausgearbeiteten Unterschiede in der Produktion wiederfinden. Dabei werden die Vorteile und Herausforderungen der markerlosen Methode im Projekt aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Aufbau der Arbeit	5
2. Allgemeine Information über Motion Capture	6
2.1. Definition von Motion Capture und Performance Capture	6
2.2. Entwicklungsgeschichte Motion Capture	6
2.3. Methoden von Motion Capture	10
2.4. Unterschiede zwischen Markerless und Markerbased	13
2.5. Fallstudien zum Einsatz des markerlosen Motion Capture	15
3. Projekt Clouded Mind	16
3.1. Projektbeschreibung von Clouded Mind	16
3.1.1. Synopsis und Ziel	16
3.1.2. Handlung	16
3.2. Technische Projektbeschreibung	17
4. Dreh mit Captury Live im Hybridfilm	19
4.1. Aufbau vom Dreh	19
4.2. Herausforderung bei Captury Live im Hybridfilm	20
4.3. Beobachtung vom Dreh	22
5. Bearbeitung von Motion Capture Daten	23
5.1. Workflow der Nachbearbeitung	24
5.2. Beobachtung von der Nachbearbeitung	25
5.2.1. Retargeting	25
5.2.2. Cleaning und Keyframe Animation	26
6. Analyse der Motion Capture Aufnahme	28
6.1. Beschreibung der Beispielclips	28
6.2. Aufnahmebedingungen	31
6.3. Bewegungsfreiheit	32
6.4. Einfluss der Kleidung	32
6.5. Trackingqualität	33
6.6. Ergebnis der Analyse	34
7. Fazit	34
Danksagung	41
Eigenständigkeitserklärung	42

1. Einleitung

Motion Capture ist die Aufnahme einer Bewegung von Mensch oder Tier und deren Übertragung auf einen animierten Körper (Midori Kitagawa, 2008). Anders als bei den herkömmlichen Animationsmethoden wie Keyframe Animation dient Motion Capture nicht dem Zweck, Bewegungen neu zu kreieren, sondern Bewegungen nachzuverfolgen, um diese zu analysieren oder weiter zu verarbeiten, indem sie in einen animierten Charakter eingesetzt werden (F. Thomas and O. Johnston, 1981; A. Sharma, 2013).

Experten sind sich uneinig, ob Filme, die mit Motion Capture erstellt wurden, als Animationsfilme bezeichnet werden dürfen. Verfechter traditioneller Animation betrachten Motion Capture nicht als Animation, sondern als Kopie der menschlichen Bewegung (B. Flückiger, 2008). Dennoch hat sich Motion Capture in den letzten Jahren im Bereich Animation und VFX Produktion etabliert.

Es wird als Hilfstool unterschiedlich eingesetzt. Zum einen kann Motion Capture als Referenz für Animationen dienen, wie beispielsweise bei der Entwicklung des Marvel-Charakters Groot. Zum anderen wird sie eingesetzt, um große Menschenmengen in sogenannten Crowd-Animationen lebendig wirken zu lassen, etwa im Liebesdrama *Titanic* von James Cameron (1997) (Sito, 2013). Vor allem jedoch werden Motion Capture Aufnahmen weiter verarbeitet, um eine realistische und glaubwürdige Performance darzustellen, wie es bei Gollum in der Fantasie-Filmtrilogie *Lord of the Rings* von Peter Jackson (2001) der Fall ist (Justin Robinson, 2024).

Motion Capture hat so in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Eine relativ neue Methode ist Markerless Motion Capture. Diese unterscheidet sich von Markerbased Motion Capture, da sie Bewegungen ohne Marker-Informationen aufnimmt. Dies hat den Vorteil, weniger Equipment zu benötigen, wird jedoch wegen des Qualitätsunterschiedes zu der Markerbased Methode nur in wenigen Filmproduktionen angewendet.

In der folgenden Arbeit wird das Verfahren mit Markerless Motion Capture beschrieben und herausgearbeitet, welche Herausforderungen in einer Filmproduktion auftreten können.

Diese Erläuterung erfolgt unter Heranziehung der Erkenntnisse aus dem Hybridfilm *Clouded Mind*, indem beschrieben wird, wie ein Motion-Capture-Workflow aussehen kann,

was die Herausforderungen bei den Dreharbeiten und den Bearbeitungen sind und welche Vorteile Markerless Motion Capture einer Filmproduktion bietet.

Clouded Mind ist ein Hybrid-Tanzfilm, der das Thema Kampf gegen Depressionen behandelt. In dem Film kämpft die Hauptfigur gegen ein Rauchmonster, das als Rauchsimulation in der Gestalt eines Menschen dargestellt wird.

Der gesamte Tanz – sowohl der Hauptfigur als auch der Darstellerin des Rauchmonsters – wurde mit dem markerlosen Motion-Capture-System Captury Live aufgezeichnet. Die Bewegungsdaten der zweiten Tänzerin, die das Rauchmonster verkörpert, dienten anschließend als Grundlage für die Animation der Rauchsimulation.

1.1. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die Umsetzung von Markerless Motion Capture anhand vom Film *Clouded Mind* zu analysieren. Zu diesem Zweck ist die Arbeit in zwei Hauptteile unterteilt. Der erste Teil dient der Vermittlung grundlegender Kenntnisse über Motion Capture und den Vergleich von Markerbased und Markerless Motion Capture. Der zweite Hauptteil analysiert anhand der zuvor erarbeiteten Informationen die Anwendung im Filmprojekt exemplarisch an 4 Videobildern.

Im ersten theoretischen Teil werden zu Beginn die Begriffe von Motion Capture und Motion Performance definiert, bevor die Thematik tiefer ergründet wird. Außerdem wird die Entstehung und technische Entwicklung von Motion Capture beschrieben. Das Kapitel behandelt sowohl die Anfänge mit der Rotoskopie als auch ihre Weiterentwicklung hin zum markerlosen Motion Capture.

Im Anschluss daran werden die Funktionsweisen von Markerbased und Markerless Motion Capture beschrieben. Darauf folgt ein Vergleich von Markerbased Methoden und Markerless Methoden. Dieser wird abgeschlossen mit der Begründung für die Verwendung des Programms Captury Live im Bachelor-Filmprojekt. Abgeschlossen wird der erste Hauptteil mit Fallbeispielen, in denen die Anwendung von markerlosem Motion Capture in drei Anwendungsbeispiele beschrieben wird.

Im zweiten Hauptteil der Arbeit (Kapitel 3–6) wird die praktische Anwendung von markerlosem Motion Capture untersucht. Diese erfolgt anhand des im Rahmen der Bachelorarbeit entstandenen Films *Clouded Mind*. Nach einer kurzen Einleitung zur

Entstehungsgeschichte des Projekts folgt eine technische Projektbeschreibung, in der insbesondere der Einsatz des markerlosen Motion-Capture-Systems Captury Live erläutert wird. Anschließend werden der Aufbau des Drehs sowie die Durchführung der Hybridfilmproduktion beschrieben, wobei die Nutzung von markerlosem Motion Capture und die damit verbundenen Herausforderungen vor und während des Drehs thematisiert werden. Darauf folgt eine Darstellung der Nachbearbeitung der Motion-Capture-Daten sowie der dabei gemachten Beobachtungen. Abschließend werden die Vor- und Nachteile von Markerless Motion Capture, welche im ersten Hauptteil erwähnt wurden, anhand von 4 Videoausschnitten analysiert.

Im Fazit werden die erarbeiteten Erkenntnisse zusammengetragen und ein Ausblick für den weiteren Einsatz von Markerless Motion Capture Methode gegeben.

2. Allgemeine Information über Motion Capture

2.1. Definition von Motion Capture und Performance Capture

Motion Capture ist der allgemeine Begriff für die Erfassung von Bewegung. Oftmals wird darunter auch nur die Verfolgung der Körperbewegung verstanden, ohne Detailaufnahmen von Gesicht oder Fingern zu betrachten (Performit Live, 2025). Die separate Aufnahme des Gesichts fällt unter den Begriff Facial Capture. Hierbei werden Mimiken des Darstellers aufgezeichnet (Mimic Productions, 2025). Finger Tracking beschreibt die Aufnahme von den Finger Bewegungen (Captury, o. J.). Werden Facial Capture und Finger Tracking mit den Körperbewegungen simultan aufgenommen, bezeichnet man dies als Performance Capture. Das Hauptziel von Performance Capture ist, die schauspielerische kreative Darstellung originalgetreu aufzuzeichnen (Sito, 2013).

2.2. Entwicklungsgeschichte Motion Capture

Obwohl man unter dem Begriff Motion Capture heutzutage die digitale Aufzeichnung von Bewegung versteht, gab es Motion Capture schon vor der digitalen Speicherung der Daten.

Der Beginn von Motion Picture war gleichzeitig auch der Beginn der Bewegungsaufzeichnung. Dies wird durch verschiedene Entdeckungen deutlich. Mit dem Projektionsgerät Zoopraxiscope studierte Eadweard Muybridge Ende des 19ten Jahrhunderts Bewegungen von Menschen und Tieren. Er hielt die Bilder in Büchern fest, die noch heute von Animatoren benutzt werden. Étienne-Jules Marey trug bei seiner

Studie einen Anzug, dessen Ergebnisse der Fotoreihe der Motion-Capture-Daten ähneln (siehe Abbildung 1) (M. Kitagawa, 2008).

Max Fleischers Erfindung der Rotoskopie war jedoch die erste, die eine Bewegung in einen animierten Charakter übertrug. Bei der Rotoskopie wird der zuvor aufgenommene Film auf eine Glasscheibe projiziert, um die Silhouette des Darstellers Bild für Bild abzuzeichnen (siehe Abbildung 2) (M. Glovart, o. J.). Zusammen mit seinem Bruder, der bei der Aufnahme ein Clownskostüm trug, erschuf er so die Cartoon-Figur Clown Koko, mit

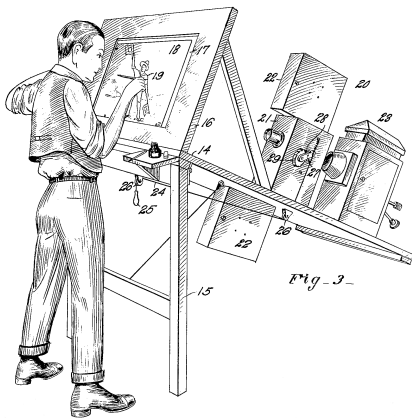


Abbildung 2: Rotoskopie von Max Fleischer

der er eine Reihe von der Kurzanimations-Serie *Out of Ink* erstellte. 1937 verwendete auch Walt Disney Rotoscoping in dem Animationsfilm *Snow White* (Fleischer Studio, o. J.).

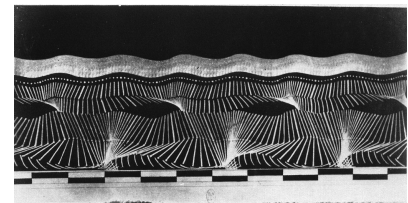
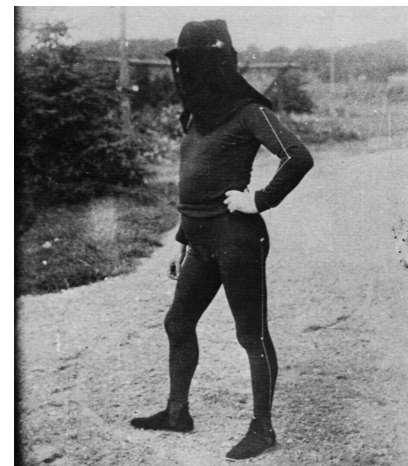


Abbildung 1: Oben: Schwarz eingekleideter Darsteller mit weißen Streifen markiert
Unten: Bewegungsaufnahme

Anfang der 1960er Jahre experimentierte Lee Harrison III mit Verfahren zur systematischen Erstellung animierter Figuren. Er entwickelte einen Sensoranzug, der Bewegungen mithilfe von Potentiometern und mechanischen Komponenten (u. a. sogenannten Lincoln Logs) erfasste und in analoge Signale umwandelte (siehe Abbildung 3).

1967 produzierte er den Film *The Stick Man*, der als eine der frühesten Anwendungen von Motion Capture gilt (Sito, 2013). Obwohl zu dieser Zeit bereits digitale Computer existierten, basierte Harrisons System auf analoger Technik. Die erzeugten Bewegungsdaten konnten daher nicht digital gespeichert, sondern mussten direkt vom Kathodenstrahlbildschirm (CRT) abgefilmt werden (B. Flückiger, 2023).



Abbildung 3: Lee Harrison Animierte Figur und Darstellerin

In den 1970er- und 1980er-Jahren wurde in der medizinischen und militärischen Forschung mit digitalen Verfahren zur Aufzeichnung von Bewegungen experimentiert. Neben der Erfindung des mechanischen Motion Capture Systems Exoskelett von Tom Calvert experimentierte die MIT Architecture Machine Groupe und das New York Institute of Computer Graphics Lab mit einem optischen Tracking System, welches mehrere Kameras und reflektierende Marker zur Bewegungsaufzeichnung nutzte (Sturman, 1994).

Da die Rechenleistung in den 80er Jahren noch nicht so groß war, gab es nur wenige computeranimierte Produktionen. Daher war der generierte Roboter in der Dosennahrung-Werbung Brilliance, produziert von Robert Abel, die während des Superball 1985 lief, eine Sensation. Die Bewegung wurde hierfür mithilfe von Punkten, die auf der Schauspielerin angebracht waren, verfolgt. Dies konnte als Referenz in den computergenerierten (CGI) Charakter eingesetzt werden (M. Kitagawa, 2008).

Als erster Fehlversuch von Motion Capture kann man die Animationssequenz im Film *Total Recall* von Paul Verhoeven (1990) betrachten. Für eine Szene, in der Arnold Schwarzenegger am Flughafen einen Röntgenscanner passiert, plante das Studio Metrolight, die Animation seines Skeletts mithilfe von Motion Capture aufzuzeichnen. Für die Motion Capture Aufnahme wurde eine Firma, die sich mit optical Motion Capture Aufnahmen beschäftigt, angestellt. Nach der Aufnahme wurde festgestellt, dass die Capture Daten nicht verwendbar waren. Die Ursache des Fehlers ist bis heute nicht ganz geklärt. Dank einer Kameraaufnahme von einem Angestellten des Metrolight Studios wurde das Skelett schließlich manuell verfolgt (M. Kitagawa, 2008).

Als Peter Jackson in seinem Film *Lord of the Rings* für den Charakter Gollum Motion Capture benutzte, war die Arbeit mit Motion Capture zwar nicht mehr neu, jedoch revolutionierte der Film die Verwendung von Motion Capture in der Filmproduktion. Dabei sollte der CGI-Charakter Gollum erst mit Keyframe-Animation erstellt werden. Da der Schauspieler Andy Serkis bei seinem Casting die Rolle jedoch so überzeugend vortrug, entschied man sich dazu, Gollums Animation von Andy Serkis spielen zu lassen (Rotten Tomatoes, 2018).



Abbildung 4: Schauspieler Andy Serkis im Motion Capture Anzug

The Polar Express (2004) von Robert Zemeckis war der erste Film der vollständig mit Performance Capture umgesetzt wurde. Dabei wurde parallel zur Körperbewegung auch Facial Capture eingesetzt.



Abbildung 5: Einsatz der Helmet-Mounted Camera Rig im Film Avatar

Ein weiterer Meilenstein in Performance Capture war der Film *Avatar* (2009) von James Cameron. Für das Facial Capture setzte das Studio Weta Digital sogenannte Helmet-Mounted Camera Rigs (Helmrigs) ein (siehe Abbildung 5). Dabei wurde eine kleine Kamera direkt vor dem Gesicht der Schauspieler befestigt, die ihre Mimik detailliert aufzeichnete und so eine präzisere

Übertragung der Gesichtsausdrücke auf die digitalen Figuren ermöglichte (M. Seymour, 2021). Darüber hinaus setzte der Film neue Maßstäbe in der sogenannten Virtual Production. Neben Performance Capture kamen virtuelle Kameras zum Einsatz, mit denen reale Kamerabewegungen nachgebildet werden konnten. Diese ermöglichten es, die Ergebnisse direkt vor Ort in Echtzeit innerhalb eines 3D-Programms zu betrachten (Gray, 2014).

Eines der ersten markerlosen Motion-Capture-Systeme, das Bewegungen anhand von Videoaufnahmen ohne Marker erfassen konnte, war das Pfinder-System 1997. Mithilfe von schon damals bekannten kinematischen, dynamischen 3D-Modellen und Hintergrundsegmentierungen konnte das System Bewegungen in Echtzeit erfassen. Es arbeitete hierbei mit einer Vereinfachung des Körpers durch Arme, Beine, Kopf und Rumpf in der Darstellung von 2D-Blobs (siehe Abbildung 6).

Durch die Gaußsche Summenformel wurde das Videobild in räumlichen Farbklassen segmentiert und als Blob dargestellt. Diese Blobs hatten neben dem Farbparameter einen räumlichen 2D-Parameter. Durch die bayessche Schätzung konnte die Position der Blobs verfolgt werden (C. Wren, 1997).

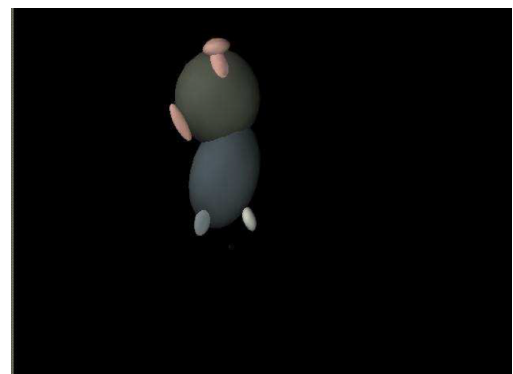


Abbildung 6: 2D Representation der Blob Segmente

Diese Methode wurde von C. Stoll u. a. 2011 erweitert, sodass Bewegungen mit 3D Gaussian Farb-Blobs in Echtzeit aufgenommen werden konnte, ohne Hintergrundsubtraktion zu benötigen (siehe Abbildung 7) (C. Stoll, 2011).

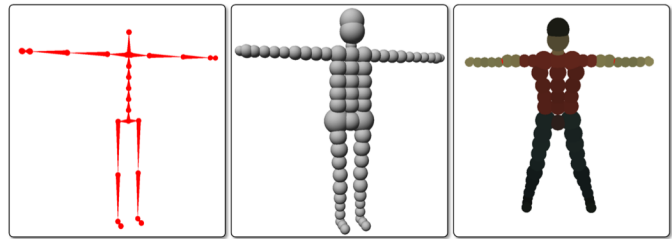


Abbildung 7 von links nach rechts: Standard Skelett, Standard Gaussian Model, Akteur spezifisches Gaussian Farbmodell

2013 entwickelte sich durch Deep Learning das DeepPose-System, welches durch Convolutional Neural Networks (CNN) eine direktere Erkennung der Position des Gelenks im Koordinatensystem mit sich brachte. Dadurch konnte die Bewegungsverfolgung noch schneller und präziser erfolgen, lieferte die Daten jedoch nicht in Echtzeit (P. Nargorny, 2025).

Durch die Forschung der letzten Jahre an Markerless Motion Capture konnte die Methode für mehr Verbraucher zugänglich gemacht werden. Softwareprogramme wie Radicalmotion machen es möglich, Bewegungen mit Handy oder Webcam aufzunehmen (T. Baker, 2020).

Darüber hinaus etablierte sich Markerless Motion Capture auch in der kommerziellen Produktion. Sony Music nutzte in einer Kollaboration mit Racquet Studio für ein virtuelles Konzert von Myles Smith das markerlose System MoveAi. Mit einem interaktiven Musikevent in Fortnite ermöglichte die markerlose Bewegungserfassung eine kosteneffiziente Methode, die den digitalen Avatar des Musikers authentisch wirken ließ (Perez Tigdam, 2025).

2.3. Methoden von Motion Capture

Um Bewegungen kompakt und nutzbar aufzuzeichnen, wird der menschliche Körper durch ein kinematisches Skelett vereinfacht. Dieses besteht aus einer reduzierten Zahl starrer Segmente, die durch Gelenke miteinander verbunden sind (M. Gleicher, 2002).

Bei Motion Capture werden die Positionen und Rotationen der Gelenke aufgezeichnet. Die Aufzeichnung kann unterschiedlich vollzogen werden. Im Wesentlichen wird zwischen markerbasiertem (Markerbased) und markerlosem (Markerless) Motion Capture differenziert. Markerless Motion Capture arbeitet dem Namen entsprechend *markerlos*. Der

Darsteller trägt weder Marker noch Sensoren am Körper. Die Bewegung wird anhand von Kamera- oder Tiefendaten aufgezeichnet. Markerbased Motion Capture benutzt Marker oder Sensoren, die an bestimmten Stellen des Körpers positioniert werden. Eine verbreitete markerbasierte Methode ist das optische Motion Capture. Sie wird häufig wegen ihrer Aufnahmequalität für Filmproduktionen verwendet (MotionAnalysis, 2023). Im Folgenden wird die Funktionsweise von Optical Markerbased Motion Capture und Markerless Motion Capture erläutert.

Bei **Optical Markerbased Motion Capture** wird das Photogrammetrie-Prinzip angewandt. Es nimmt ein Objekt aus verschiedenen Blickwinkeln auf, um mit reflektierenden und emittierenden Markern die räumliche Position des Objekts in einem dreidimensionalen Raum zu bestimmen (MotionAnalysis, 2023).

Bei den Markern unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Markern. Aktive Marker setzen sich aus Infrarot emittierenden Lichtern, meistens LEDs, zusammen. Durch den Filter des Infrarotsignals können die aktiven Marker selbst bei Sonnenstrahlen erfasst werden und kommen daher vor allem bei Dreharbeiten im Außenbereich zum Einsatz (Advanced Realtime Tracking, o. J.).



Abbildung 8: Optical Motion Capture Anzug im Film *Avengers: Infinity War* (2018) von Anthony und Joe Russo

Passive Marker sind reflektierende Elemente, die das Infrarotlicht ausgehend von einer Lichtquelle reflektieren. Häufig werden als Marker Kugeln, überzogen mit einer retro-reflektierenden Folie, oder Aufklebern aus retro-reflektierendem Material verwendet. Die passiven Marker sind im Gegensatz zu aktiven Markern weniger empfindlich. Jedoch sollte Sonnenlicht vermieden werden, da dieses mit den Daten des ausgesendeten Infrarotlichts kollidieren könnte (OptiTrack, o. J.).

Bei **Markerless Motion Capture** erfolgt die Bewegungsverfolgung mit Computer Vision und Deep Learning, die aus Bildmustern die Positionen der Körpersegmente lokalisieren und nachverfolgen können (VisCircle, 2018). Dabei werden Algorithmen und

Neuronale Netzwerke eingesetzt, die mit Datensätzen trainiert wurden, um Posen zu schätzen und die Bewegung durch Optimierung zu verfeinern.

Deep Learning ist eine Technologie des maschinellen Lernens, welches auf neuronalen Netzwerkstrukturen beruht.

Diese sind aufgebaut aus mehreren Eingaben, die zu Knotenpunkten kombiniert werden. Anhand dieser Knotenpunkte werden Entscheidungen getroffen, um daraus eine Ausgabe zu erzeugen. Jeder Knotenpunkt enthält neben der Entscheidungsfrage eine Gewichtung und eine Aktivierungsfunktion. Erfüllt die Formel der Aktivierung eine entsprechende Zahl, wird die Verbindung zum nächsten Knotenpunkt aktiviert (siehe Abbildung 9). Dabei durchläuft das Netzwerkmodell mehrere Schichten. Befinden sich im Netzwerk zwischen der Eingabe und der Ausgabe mehr als 3 Schichten, spricht man von Deep Learning (G. Boesch, 2021).

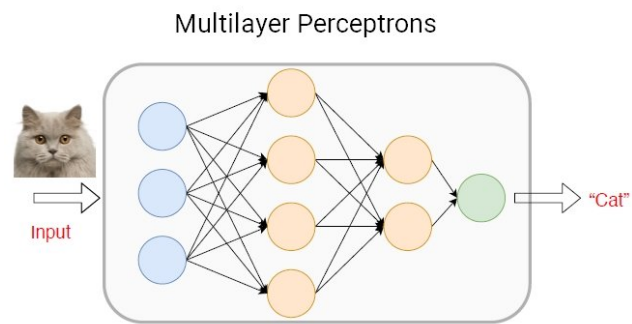


Abbildung 9: Neuronale Netzwerkstrukturen Aufbau.

Im Kontext der markerlosen Bewegungserfassung werden Convolutional Neural Networks eingesetzt, um die Gelenkposition aus einem zweidimensionalen Bild zu schätzen. Ein Beispiel für dieses Modell ist der von Tompson ConvNet-Modell zur menschlichen Posenschätzung. Diese bestimmt für jedes einzelne Frame der Videoaufnahme die Gelenkposition des kinematischen Skeletts, indem es mit einer sogenannten Heatmap arbeitet. In der Heatmap sind die Wahrscheinlichkeiten der Position des jeweiligen Gelenkes dargestellt und daraus kann die 2D-Position der Gelenke des Darstellers abgeleitet werden (H. Rhodin, 2016).

Des Weiteren können auch klassische Algorithmen, wie die Visual-Hull-Methode oder Sum of Gaussian eingesetzt werden, um Körperregionen zu erfassen und zu tracken. Bei Visual Hull wird ein Silhouettenschnittverfahren angewandt, welches durch die segmentierte Silhouetten-Darstellung im 2D-Kamerabild eine Schnittmenge berechnet. Diese so entstandenen Schnittmengen werden dann in ein 3D-Volumen rekonstruiert (D. Schneider, 2021). Beim Sum of Gaussian wird der menschliche Körper durch die Überlagerung mehrerer 3D-Gaußfunktionen in einen glatten volumetrischen Dichtefeld dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht es, die Pose mit dem kinematischen Skelett zu

verknüpfen und einen Bildabgleich zwischen rekonstruiertem Körpermodell und Kamerabildern herzustellen (C. Stoll, 2011). Das Programm Captury Live, das im Projekt zum Einsatz kam, verwendet diese Gaußsche-Dichtungsdarstellung zusammen mit KI-Optimierungen (S. Harsted, 2019; Captury, o. J.).

2.4. Unterschiede zwischen Markerless und Markerbased

Im Folgenden wird das kamerabasierte Multi-Camera-Markerless-System mit dem Optical Markerbased-System verglichen. Beide haben die Gemeinsamkeit, dass sie auf einem Mehrkamera-Prinzip beruhen, bei dem mehrere Kameras um den Aufnahmebereich verteilt sind. Dadurch ergibt sich bei beiden Verfahren eine Einschränkung des Aufnahmevolumens. Befindet sich der Schauspieler außerhalb dieses Volumens, kann seine Bewegung nicht aufgenommen werden. Er muss sich daher innerhalb dieses Bereichs bewegen. Des Weiteren sind die Kameras während der Aufnahme fest am Set installiert und können ohne eine erneute Kalibrierung nicht verstellt werden.

Markerlose und markerbasierte Systeme unterscheiden sich in ihrer Arbeitsweise. Da Markerless Motion Capture keine Marker oder spezielle Anzüge benötigt, ergeben sich qualitative und pragmatische Unterschiede. Im Folgenden werden einige dieser Unterschiede dargestellt und erläutert, welche Vor- und Nachteile sich für die jeweiligen Systeme ergeben.

Ein Unterschied ist dabei die **Qualität der Trackingdaten**. Markerless Motion Capture schätzt die Positionen der Körpersegmente in den Bilddaten mittels Pose-Estimation-Algorithmen, während markerbasierte Systeme die 3D Position der Marker durch Triangulation berechnen und daraus die Körperpose rekonstruieren. Unter kontrollierten Bedingungen weisen markerbasierte Verfahren in der Regel geringere Messfehler auf als aktuelle markerlose Ansätze (K. Das, 2023). Ein direkter Vergleich ist jedoch nur bedingt möglich, da sowohl markerbasierte als auch markerlose Systeme innerhalb ihrer jeweiligen Kategorie auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen beruhen und je nach Anwendung variierende Qualität liefern. Aktuelle Forschungen, wie MAMMA (Markerless & Automatic Multi-Person Motion Action Capture), zeigen ein Verfahren mit SMPL-X-Fitting (Skinned Multi-Person Linear), dessen Ergebnisse qualitativ an kommerzielle markerbasierte Systeme heranreichen. Das System arbeitet jedoch mit einer Postproduktions-Pipeline und kann keine Echtzeitdaten liefern, wie es bei anderen Markerless Verfahren - etwa Captury Live - der Fall ist (H. Cuevas-Velasquez, 2025).

Ein weiterer Unterschied ist die **Bewegungsfreiheit** des Darstellers. Bei Markerless Motion Capture hat der Darsteller keine Bewegungseinschränkungen. Dies ermöglicht dem Darsteller Freiheiten in der Performance. Bei Optical MoCap mit aktiven Markern sind die LED Marker sensibel und teuer zu ersetzen. Passive Marker haben hier den Vorteil, dass sie leicht austauschbar sind. Der Nachteil hierbei ist jedoch, dass bei komplexen Bewegungen oder Stürzen Marker abfallen können, was zur Störung der Bewegungsaufzeichnung führt (M. Kitagawa, 2008). Zusammenfassend hat Markerless hier den Vorteil, Bewegungen ausführen zu können, ohne dass der Darsteller Angst haben muss Marker zu beschädigen oder zu verlieren (A. Elhayek, 2015).

Ergänzend zu diesem Aspekt gibt es Unterschiede in der **Kleidungswahl**. Markerbased MoCap ist gebunden an einen nichtreflektierenden schwarzen Anzug, auf dem die Marker befestigt werden oder in den sie schon integriert sind. Beim markerlosen System kann jede Alltagsbekleidung getragen werden, sofern alle Körpersegmente zu sehen sind und nicht von Rücken oder Kleidern bedeckt werden. Jedoch kann die Tracking-Qualität gesteigert werden, wenn die Kleidung anliegend am Körper ist und einzelne Körpersegmente sich mit unterschiedlichen Kontrasten abheben. Zum Beispiel hebt sich die Farbe des Unterarm beim Tragen von T-Shirts vom Körperrumpf ab, sodass der am Körper anliegende Arm einen Kontrast zur Kleidung der Körpermitte darstellt (Captury, 2025; S. Jürgens, 2020).

Zwar ist Markerless Motion Capture für eine verbesserte Tracking-Qualität an bestimmte Kleidungsnormen gebunden, bietet jedoch im Vergleich zu Markerbased eine größere Freiheit bei der Kleiderauswahl.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Nutzerfreundlichkeit. Bei der markerbasierten Methode müssen Marker an bestimmten Positionen am Darsteller angebracht werden (zB. beim OptiTrack System) (OptiTrack, o. J.). Die Methode erfordert daher einen Experten, der die Platzierung der Marker kennt. Im Gegensatz dazu ist das Verfahren bei markerlosen Systemen einfacher. Für die Kalibrierung stellt sich der Darsteller in die Mitte des Aufnahmebereichs in einer T-Pose. Der Aufbau ist somit unkomplizierter und bietet den Vorteil, dass auch Nutzer mit geringer Expertise diese Motion-Capture-Methode verwenden können (J. Daemen, 2013).

Im Projekt Clouded Mind wurde sich trotz der qualitativen Unterschiede für das markerlose System Captury Live entschieden, da es mir maximale Bewegungsfreiheit gibt, eine größere Kleiderauswahl und eine unkompliziertere Nutzung bei der Tracking Aufnahme ermöglicht.

2.5. Fallstudien zum Einsatz des markerlosen Motion Capture

In den letzten Jahren wurde Markerless Motion Capture in verschiedenen Bereichen der audiovisuellen Produktion eingesetzt. Dabei ist der Einsatzbereich vielfältig. Das Spektrum reicht von virtuellen Fernsehproduktionen bis hin zur künstlerischen Verwendung in Tanzfilmen und kostengünstigen Animationsproduktionen.

J. Daemen u. a. demonstrieren den Einsatz von Markerless Motion Capture in einem virtuellen TV-Studio, das Interaktionen der Moderatoren mit computergenerierten Avataren ermöglicht. Für die Studie wurden drei Schauspieler im Studio aufgenommen, um diese in die virtuelle Welt einzufügen. Die Akteure interagierten mit den virtuellen Objekten und Avataren und aktivierten durch Bewegungen Animationen. Die Arbeit zeigt, dass virtuelle Fernsehproduktionen mit einem vergleichsweise unkomplizierten Setup realisierbar sind (J. Daemen, 2013).

Jürgens u. a. untersuchen in einer Fallstudie, wie Fehler und Glitches in der Bewegungserfassung bewusst als ästhetisches Mittel in der Choreografie eingesetzt werden können. Normalerweise versuchen MoCap-Produktionen, diese Fehler und Störungen zu vermeiden. Für das Projekt wurde jedoch ein Glitch-Verfahren entwickelt, das an die künstlerischen Ziele des Choreografen angepasst wurde. Dadurch konnten die Störungen und Fehler als künstlerisches Stilmittel verwendet werden (S. Jürgens, 2020).

Eine weitere Studie von Z. Lai u. a. präsentiert einen MoCap-Animationsprozess, der auf dem Deep-Learning-System MediaPipe und monokularen RGB-Kameras beruht. Dieses erfasst Bewegungen in Echtzeit mit einem monokularen RGB-Kamerasystem und bietet damit eine Alternative zu einem Multi-Kamera-Setup. Die resultierende Charakteranimation konnte ohne den Einsatz spezialisierter MoCap-Hardware erstellt werden. Dies zeigt, dass markerlose Verfahren ein kostengünstiges Setup bei gleichzeitig hoher visueller Qualität ermöglichen (Z. Lai, 2024).

3. Projekt Clouded Mind

3.1. Projektbeschreibung von Clouded Mind

Das Markerless Motion Capture System Captury Live kam in dem Tanzfilm *Clouded Mind* zum Einsatz. Um einen Überblick zu diesem Film zu geben, wird im folgenden Kapitel die Synopsis und das Ziel des Filmes sowie die Handlung beschrieben.

3.1.1. Synopsis und Ziel

Der Tanzfilm *Clouded Mind* stellt Depressionen als einen inneren Kampf gegen Hass, Angst und Kritik dar. Genauer gesagt geht es darum, den Kampf loszulassen. Die Hauptdarstellerin fühlt sich im Hass gefangen und sieht nur die Lösung, ihn mit eigener Kraft zu bekämpfen. Dabei stellt sie fest, dass der eigentliche Gegner sie selbst ist und sie die ganze Zeit gegen sich selbst kämpft. Am Ende des Kampfes fühlt sich die Tänzerin leer und ausgelaugt, weil sie sich selbst nicht wertschätzt und keinen Ausweg aus ihrer Situation sieht. Diese Gefühle sollen durch Tanz und visuelle Effekte vermittelt werden. Am Ende sollen aber nicht die Depression und die Selbstvorwürfe im Vordergrund stehen, sondern die Hoffnung auf Selbstannahme.

Ziel des Films ist es zum einen, auf Depressionen aufmerksam zu machen und einen Einblick in die innere Gefühlswelt zu geben. Zum anderen richtet sich der Film an Menschen, die selbst Erfahrungen mit Depressionen gemacht haben oder jemanden kennen, der daran erkrankt ist. Er soll eine Ermutigung sein, sich selbst wertzuschätzen.

3.1.2. Handlung

Die Tänzerin sitzt auf einem Stuhl in der Mitte des Raumes und trägt eine Zwangsjacke. Nebel steigt auf. Hinter der Tänzerin baut sich eine Rauchgestalt auf und greift mit einem Würgegriff die Tänzerin an. Erschrocken versucht sich die Tänzerin zu befreien. Sie reißt sich los und steht von ihrem Stuhl auf. Als sie sich umdreht, ist das Rauchmonster verschwunden.

Die Tänzerin will nach vorne gehen, als das Monster von hinten auftaucht und sie am Kopf packt. Die Tänzerin wehrt sich und kämpft gegen das Monster.

Der Kampf zwischen der Tänzerin und dem Monster ist wie ein Schattenspiel. Die Bewegungen der beiden Kontrahenten spiegeln sich. Die Tänzerin versucht mit aller Kraft, sich von dem Monster zu befreien. Doch bei jedem Versuch, das Monster zu besiegen, scheitert die Tänzerin.

Dann verwandelt sich ihr Gegner in ihr Spiegelbild vor ihr und kommt auf sie zu. In einer Rückblende sieht man die Tänzerin allein gegen sich selbst kämpfen. Dazwischen wird zur Szene in der Gegenwart gesprungen, in der sich die Tänzerin selbst die Beine zusammenbindet. Schließlich sitzt die Tänzerin gefesselt auf dem Boden. Ihre Arme sind um ihren Bauch geschlungen.

Dann fällt ein kleines Goldblättchen auf ihre Haut. Sie sieht hoch und sieht ein goldenes Licht, welches auf sie strahlt. Sie will aufstehen, aber die Fesseln halten sie davon ab. Sie löst die Fesseln und zieht die Zwangsjacke aus. Unter der Zwangsjacke trägt sie ein goldenes Kleid. Sie steht auf und blickt nach oben.

3.2. Technische Projektbeschreibung

Meine Rolle im Projekt umfasste die Funktionen des Regisseurs und Autors des Films sowie die des Editors und VFX-Artists in der Postproduktion. Die Produktion wurde durch weitere Teammitglieder während der Choreografie, der Drehproduktion sowie der Nachbearbeitung unterstützt.

Für die Motion-Capture-Aufnahme wurde das markerlose Motion-Capture-System Captury Live eingesetzt. Dieses System arbeitet mit einer Echtzeit-Anzeige von Multikamera-Videoaufnahmen. Für ein zuverlässiges Tracking werden mindestens vier Kameras benötigt, wobei laut Hersteller für stabile Ergebnisse acht oder mehr Kameras empfohlen werden.



Abbildung 10: Studioraum

Im Projekt Clouded Mind wurde mit 10 Kameras eine Aufnahmefläche von ca. 8 m x 6 m aufgenommen. Verwendet wurden Flir Blackfly® S Kameras mit einer Auflösung von 1440 x 1080 px und einer Pixelgröße von 3.45 µm x 3.45 µm. Diese entsprechen den

empfohlenen Anforderungen für den Einsatz mit Captury Live (Captury Technische Dokumentation, o. J.).

Die Kameras wurden mit möglichst gleichmäßigem Abstand um die Tanzfläche verteilt. Der Neigungswinkel der Kameras sollte 60° nicht überschreiten, da das zugrunde liegende KI-Modell des Systems für diesen Winkelbereich trainiert wurde. Diese Voraussetzung konnte im Projekt eingehalten werden. Zusätzlich wurde die Trackingqualität durch drei höher positionierte Kameras verbessert.

Die empfohlene Kamerahöhe sollte mindestens auf Kopfhöhe der Darstellerinnen oder höher liegen. Im Projekt war die Umsetzung dieser Empfehlung jedoch durch die verfügbaren Stative eingeschränkt. Sieben der verwendeten Stative waren etwa 30 cm niedriger als die empfohlene Höhe.

Ein weiterer wichtiger Faktor für eine stabile Motion-Capture-Aufnahme ist die Beleuchtung des Aufnahmebereichs. Idealerweise sollte der Raum möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein, um eine konstante Bildqualität für alle Kameras zu gewährleisten. Für die filmische Umsetzung der Szene wurde der Aufnahmebereich jedoch bewusst mit einer Drei-Punkt-Beleuchtung ausgeleuchtet. Die Hauptbeleuchtung bestand aus einem Keylight von links, einem Filllight von rechts sowie einem Kantenlicht von hinten links. Zusätzlich wurde der Greenscreen gleichmäßig ausgeleuchtet, um eine klare Abgrenzung des Hintergrunds zu ermöglichen. Da das Keylight jedoch deutlich stärker war als das Filllight und das Kantenlicht, entstand keine vollständig gleichmäßige Beleuchtung, die ein stabiles Tracking der MoCap-Aufnahme ermöglicht.

Ein weiterer relevanter Faktor für markerloses Motion Capture ist die Kleidung der Darstellerinnen. Obwohl Captury Live grundsätzlich mit unterschiedlichen Kleidungsstilen arbeiten kann, wird empfohlen, eng anliegende Kleidung mit klaren Farbkontrasten zwischen verschiedenen Körpersegmenten zu verwenden (Captury, 2025). Insbesondere Kontraste zwischen Unterarm und Oberkörper erleichtern dem System die Unterscheidung der Körperteile. Die Darstellerin des Rauchmonsters trug daher Kleidung mit deutlich unterscheidbaren Farbsegmenten. Sie trug einen grünen Anzug,



Abbildung 11: Motion Capture Kleidung beim Testdreh

darüber ein blaues T-Shirt sowie eine rote Sporthose, wodurch sich Beine, Oberkörper und Arme visuell voneinander unterschieden (siehe Abbildung 11). Diese Farbkontraste unterstützten das Motion-Capture-System dabei, die einzelnen Körpersegmente zuverlässiger zu erkennen und zu tracken.

4. Dreh mit Captury Live im Hybridfilm

4.1. Aufbau vom Dreh

Nach der Aufstellung der Kameras wurden diese im Programm kalibriert. Der Kalibrierungsprozess umfasst zwei Schritte: die intrinsische Kalibrierung sowie die extrinsische Kalibrierung. Die intrinsische Kalibrierung bestimmt die Eigenschaften der Kamera selbst, beispielsweise Objektivverzerrungen oder Brennweite. Die extrinsische Kalibrierung hingegen ermittelt die Position und Orientierung der Kameras im Raum (Captury Technische Dokumentation, o. J.).

Im Projekt Clouded Mind wurde für die Kalibrierung ein Musterboard mit einer Größe von 60×40 cm verwendet.

Die intrinsische Kalibrierung dient der Bestimmung kamerainterner Parameter wie Brennweite und Linsenverzerrung. Hierfür wurde das Musterboard nacheinander vor jede Kamera gehalten und in verschiedenen Positionen im Sichtfeld der Kamera bewegt. Sobald das System das Board erkannte, erschien im Programm Captury Display ein orangefarbenes und grünes Raster, das den Fortschritt der Kalibrierung visualisierte. Um eine präzise Kalibrierung zu ermöglichen, wurde das Board nicht nur parallel zur Kamera gehalten, sondern auch in unterschiedlichen Winkeln bewegt.

Die extrinsische Kalibrierung bestimmt anschließend die Position und Orientierung der Kameras im dreidimensionalen Raum durch das Verfahren der Kameraposen-Bestimmung. Dabei berechnet das System die räumliche Beziehung zwischen den einzelnen Kameras, indem es gemeinsame Referenzpunkte erkennt und deren Position im Raum bestimmt. Sobald das Musterboard von mindestens zwei Kameras gleichzeitig erfasst wird, kann das System die räumliche Korrespondenz zwischen diesen Kameras berechnen. Idealerweise sollte das Board dabei von möglichst vielen Kameras gleichzeitig erfasst werden. Im Programm werden erkannte Referenzpunkte als grüne Punkte dargestellt. Diese zeigen Positionen im Raum an, die von mindestens zwei Kameras

gleichzeitig erfasst wurden. In Captury Display wird außerdem angezeigt, wie stark sich die Sichtfelder der Kameras überlappen. Wenn im Kamerabild hauptsächlich rote oder orangefarbene Punkte sichtbar sind, bedeutet dies, dass nur wenige Übereinstimmungen mit anderen Kameras vorhanden sind. Dieses Problem trat im Projekt insbesondere bei Kameras auf, die seitlich nach vorne oder hinten ausgerichtet waren und aufgrund ihrer niedrigeren Position ein eingeschränktes Sichtfeld besaßen.

Nachdem die extrinsische Kalibrierung durchgeführt war, wurde der Boden kalibriert, um den Ursprung des Koordinatensystems festzulegen. Hierfür wurde das Musterboard in die Mitte des Aufnahmebereichs gelegt.

Der Aufbau und die Kalibrierung des Systems erfolgten einen Tag vor dem eigentlichen Dreh. Insgesamt nahm die Kalibrierung nur wenige Stunden in Anspruch. Zu Beginn wurde dieser Prozess nur von mir durchgeführt, später wurde ich dabei durch weitere Personen unterstützt, wodurch sich der Aufbauprozess beschleunigte. Die eingearbeiteten Helfer konnten die Funktionsweise der Kalibrierung schnell nachvollziehen. Dies deutet darauf hin, dass markerlose Motion-Capture-Systeme wie Captury Live eine vergleichsweise benutzerfreundliche Bedienung ermöglichen.

4.2. Herausforderung bei Captury Live im Hybridfilm

Bereits im Vorfeld des Projekts wurden mehrere mögliche Herausforderungen identifiziert. Dazu gehörten insbesondere die Positionierung der Motion-Capture-Kameras, die Beleuchtung des Studios sowie die Kleidung der Darstellerinnen.



Abbildung 12: *Clouded Mind* Aufnahme

Für eine präzise Bewegungserfassung ist es notwendig, die Darstellerinnen aus möglichst vielen Perspektiven zu erfassen. Gleichzeitig bestand jedoch die Herausforderung, dass die Live-Action-Kamera während der Aufnahme teilweise in das Motion-Capture-Aufnahmevervolumen hineinragte (siehe Abbildung 12) und dadurch das Sichtfeld einzelner MoCap-Kameras verdecken

konnte. Um dennoch eine ausreichende Abdeckung des Aufnahmebereichs zu gewährleisten, wurden insgesamt 10 Motion-Capture-Kameras eingesetzt.

Für die Live-Action-Aufnahmen bestand zudem die Anforderung, dass möglichst wenige Motion-Capture-Kameras im Hintergrund des Bildes sichtbar sein durften. Dies wurde durch die hohe Anzahl an MoCap-Kameras zusätzlich erschwert. Gleichzeitig sollten die Kameras für eine zuverlässige Bewegungserfassung möglichst gleichmäßig um den Aufnahmebereich verteilt werden. Eine Platzierung der MoCap-Kameras direkt hinter der Live-Action-Kamera war daher nicht möglich. Als Kompromiss wurde berücksichtigt, dass die Stative die aufgrund ihrer Bauweise stärker sichtbar waren am Rande des Aufnahmebereichs platziert wurden. Drei größere Stative waren deutlich auffälliger als die 7 kleineren und schmalen Varianten. Daher wurden zwei der größeren Stative außerhalb des Live-Action-Bildbereichs positioniert, während ein weiteres großes Stativ in der linken Ecke des Studios platziert wurde.

Eine weitere Herausforderung während des Drehs stellte die Beleuchtung des Studios dar. Für eine zuverlässige Motion-Capture-Aufnahme ist eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung des Raumes erforderlich. Im vorliegenden Projekt war die gewünschte Filmstimmung jedoch eher dunkel und wurde hauptsächlich durch ein Keylight erzeugt, das stärker von einer Seite auf die Szene gerichtet war. Da der Greenscreen gleichzeitig gleichmäßig ausgeleuchtet werden musste, wurde die allgemeine Raumbeleuchtung leicht erhöht. Dadurch konnte ein Kompromiss zwischen der filmischen Lichtgestaltung und den Anforderungen der Motion-Capture-Aufnahme erreicht werden. Eine speziell auf Motion Capture optimierte Beleuchtung war jedoch nicht vollständig umsetzbar.

Eine weitere Herausforderung wurde durch die Kleidung der Darstellerinnen herbeigeführt. Die Darstellerin des Rauchmonsters konnte Kleidung tragen, die speziell auf die Anforderungen des Motion-Capture-Trackings abgestimmt war. Die Haupttänzerin hingegen war an ein bestimmtes Kostüm gebunden. Damit ihre Bewegungen dennoch zuverlässig erfasst werden konnten, trug sie ein eng anliegendes Kostüm. Für die filmische Umsetzung wurde ein weißer Anzug gewählt. Dieser erzeugte jedoch zwischen Unterarm, Oberkörper und Beinen nur geringe Farbkontraste und erfüllte daher nicht alle optimalen Voraussetzungen für das markerlose Tracking. Da die



Abbildung 13: *Clouded Mind* Aufnahme. Vorne sitzt Haupttänzerin, hinter ihr steht die Rauchmonsterdarstellerin.

Motion-Capture-Aufnahme der Haupttänzerin primär als Referenz für die Animation verwendet wurde, wurde dieser Aspekt im Projekt bewusst in Kauf genommen.

4.3. Beobachtung vom Dreh

Während des Drehs konnten mehrere Beobachtungen hinsichtlich der Motion-Capture-Aufnahme gemacht werden.

Für die Live-Action-Aufnahme waren immer wieder Stative der MoCap-Kameras im Bild. Durch die dynamische Bewegung der Tänzerinnen und wechselnde Kamera-Perspektiven konnte nicht verhindert werden, dass die MoCap-Kameras im Hintergrund der Darstellerinnen sichtbar waren. Dies erschwerte die Retuschierung in der Nachbearbeitung.

Insgesamt verlief die Bewegungsaufnahme relativ stabil. Während der Produktion kam es jedoch zu einzelnen Programmabstürzen, deren genaue Ursache nicht eindeutig festgestellt werden konnte. Nach einem Neustart blieb die zuvor durchgeführte Kalibrierung jedoch erhalten, sodass sie nicht erneut durchgeführt werden musste.

Bei der ersten Sichtung der Motion-Capture-Daten zeigte sich ein Unterschied in der Trackingstabilität im Vergleich zu den zuvor durchgeführten Testaufnahmen. Während der Testdrehs herrschte eine gleichmäßigere Raumbeleuchtung. Daraus lässt sich schließen, dass die ungleichmäßige Beleuchtung während des eigentlichen Drehs die Trackingqualität teilweise beeinträchtigt haben könnte.

Zudem wurde beobachtet, dass bei der Haupttänzerin häufiger Trackingfehler auftraten als bei der Darstellerin des Rauchmonsters. Ein möglicher Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Kleidung der beiden Darstellerinnen. Die Darstellerin des Monsters trug Kleidung mit deutlichen Farbkontrasten zwischen verschiedenen Körpersegmenten. Dadurch konnte das System diese Bereiche besser voneinander unterscheiden und stabiler tracken. Die Haupttänzerin trug hingegen ein weitgehend einfarbiges Kostüm, wodurch einzelne Körpersegmente visuell weniger klar voneinander abgegrenzt waren. Dennoch zeigte sich insgesamt eine solide Trackingqualität, obwohl die Kleidung nicht vollständig den empfohlenen Voraussetzungen entsprach.

Bei beiden Darstellerinnen konnte außerdem ein gewisses Trackingrauschen in den Bewegungsdaten festgestellt werden. Dieses war jedoch nie so stark ausgeprägt, dass die Daten für die Nachbearbeitung unbrauchbar gewesen wären.

Ein Vorteil des Systems, der während des Drehs deutlich wurde, war die Echtzeit-Darstellung der Motion-Capture-Daten (siehe Abbildung 14). Dadurch konnten mögliche Trackingfehler bereits während der Aufnahme erkannt werden. In einigen Fällen war es möglich, darauf unmittelbar zu reagieren, beispielsweise indem die Darstellerinnen neu auf das jeweilige Skelett kalibriert wurden.

Eine mögliche Erweiterung des Workflows wäre die Echtzeitvisualisierung der Rauchsimulation während des Drehs gewesen, beispielsweise durch eine Integration in ein Game-Engine-Programm wie Unreal Engine. Da die Rauchsimulation jedoch mit der Simulationssoftware EmberGen erstellt wurde und eine entsprechende Integration in Unreal Engine innerhalb des Projektzeitraums nicht umgesetzt werden konnte, wurde auf diese Möglichkeit verzichtet. Dadurch bestand der Nachteil, dass die Wirkung der Rauchsimulation nicht bereits während des Drehs visualisiert werden konnte.



Abbildung 14: Beobachtung der Motion Capture Aufnahme in Captury Live

5. Bearbeitung von Motion Capture Daten

Die Motion-Capture-Daten wurden im Anschluss an den Dreh weiterverarbeitet. Zwei zentrale Arbeitsschritte bildeten dabei das Retargeting, also die Übertragung der Bewegungsdaten auf einen Zielcharakter, sowie das Cleaning, bei dem Fehler und Instabilitäten in den Bewegungsdaten korrigiert wurden. Zusätzlich wurden Teile der Animation in eine Keyframe-Animation überführt, um einzelne Körperpositionen gezielt anpassen zu können.

Für die Bearbeitung wurden die Software Autodesk Maya mit dem Plug-in HumanIK sowie das Animationsprogramm Cascadeur verwendet. Autodesk Maya ist eine etablierte Software zur Erstellung und Animation von 3D-Objekten und Charakteren und wird in

Film-, Fernseh- und Spieleproduktionen eingesetzt (Kumar, 2022). HumanIK ist ein in Maya integriertes Tool zur Übertragung von Charakteranimationen zwischen unterschiedlichen Figuren. Dabei ermöglicht es auch die Übertragung von Animationen zwischen Charakteren mit unterschiedlichen Skelettstrukturen und Proportionen (vgl. Autodesk Maya Help, „HumanIK“).

Cascadeur ist eine Animationssoftware, die insbesondere für Keyframe-Animationen entwickelt wurde. Sie kombiniert physikbasierte Bewegungsmodelle mit KI-gestützter Posenoptimierung. Ziel ist es, die Erstellung realistischer Charakterbewegungen zu unterstützen.

Im Folgenden werden der Workflow der Nachbearbeitung sowie Beobachtungen und Herausforderungen während der Bearbeitung der Motion-Capture-Daten beschrieben.

5.1. Workflow der Nachbearbeitung

Der Arbeitsablauf wurde im Verlauf des Projekts mehrfach angepasst. Zu Beginn orientierte sich der Workflow an einem klassischen Vorgehen. Dabei wurden zunächst die Motion-Capture-Daten bereinigt (Cleaning), anschließend auf den Zielcharakter übertragen (Retargeting) und danach weiterbearbeitet, um sie in die Simulation zu integrieren.

Im Verlauf des Projekts wurde dieser Ablauf angepasst, um einen effizienteren Arbeitsprozess zu ermöglichen. In der optimierten Vorgehensweise wurde die Bewegung zunächst auf den CGI-Zielcharakter übertragen und anschließend in das Simulationsprogramm EmberGen exportiert, um eine visuelle Vorschau der Szene zu erhalten. Auf dieser Grundlage konnte erkannt werden, an welchen Stellen Anpassungen der Körperposen erforderlich waren.

Anschließend wurde der CGI-Charakter in Cascadeur bearbeitet. Dabei wurden Fehler in den Motion-Capture-Daten korrigiert und die Animation teilweise in eine Keyframe-Animation umgewandelt, um die Körperpositionen gezielter anpassen zu können. Nach Abschluss dieser Bearbeitung wurde die Animation als FBX-Datei exportiert und für die weitere Verarbeitung bereitgestellt.

5.2. Beobachtung von der Nachbearbeitung

Im folgenden Abschnitt werden die beiden zentralen Arbeitsschritte der Motion-Capture-Bearbeitung – Retargeting sowie Cleaning mit Keyframe-Animation – beschrieben. Zudem werden Herausforderungen erläutert, die während des Arbeitsprozesses aufgetreten sind.

5.2.1. Retargeting

Im ersten Schritt der Motion-Capture-Bearbeitung werden die aufgezeichneten Bewegungsdaten auf einen neuen Charakter übertragen. Dieser Vorgang wird als Retargeting bezeichnet. Da unterschiedliche CGI-Charaktere jeweils eigene Skelettstrukturen besitzen, ist dieser Schritt notwendig, um die aufgezeichnete Bewegung korrekt auf den Zielcharakter anzuwenden.

Zu Beginn des Retargeting-Prozesses werden sowohl der Quellcharakter als auch der Zielcharakter in eine standardisierte Ausgangsposition gebracht. Diese Pose wird als T-Pose bezeichnet, da die Körperhaltung dem Buchstaben „T“ ähnelt (siehe Abbildung 15).

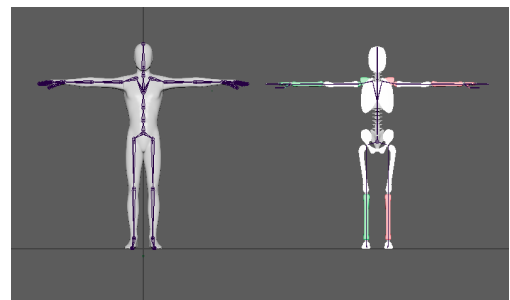


Abbildung 15 von links: Zielcharakter und Quellcharakter in T-Pose

Anschließend können Hilfstools wie HumanIK oder entsprechende Retargeting-Plug-ins verwendet werden. In diesen Tools werden der Quellcharakter und der Zielcharakter definiert sowie ihre jeweilige Knochenstruktur zugeordnet. Auf dieser Grundlage kann die Bewegung automatisch vom Quellcharakter auf den Zielcharakter übertragen werden.

Im Projekt bestand zunächst die Herausforderung darin, eine geeignete Methode für das Retargeting zu finden. Zu Beginn wurde eine manuelle Methode ohne spezielle Hilfstools eingesetzt. Dabei wurde die Knochenstruktur des Quellcharakters kopiert und auf den Zielcharakter übertragen. Anschließend mussten die einzelnen Knochen und Gelenke manuell an die Proportionen des CGI-Charakters angepasst werden. Diese Methode erwies sich jedoch als ineffizient. Zum einen war der Arbeitsaufwand sehr hoch, zum anderen gingen dabei teilweise Informationen wie die Bone Weights verloren oder mussten neu definiert werden.

Im weiteren Verlauf wurde daher das Tool HumanIK verwendet. Nach der Definition der Charakterstruktur konnte dieses Tool die Bewegungsdaten automatisch übertragen. Dadurch wurde der Retargeting-Prozess deutlich effizienter und zuverlässiger.

5.2.2. Cleaning und Keyframe Animation

Der zweite zentrale Arbeitsschritt in der Bearbeitung der Motion-Capture-Daten ist das Cleaning. Dabei werden Fehler und Instabilitäten in den aufgezeichneten Bewegungsdaten korrigiert. Solche Fehler treten bei Motion-Capture-Aufnahmen häufig auf und äußern sich meist in Form von Trackingrauschen, also kleinen Positionsschwankungen einzelner Gelenke. Eine zentrale Herausforderung beim Cleaning besteht darin, Trackingfehler zu entfernen, ohne die ursprünglichen Bewegungsdaten zu verfälschen.

Zu Beginn des Projekts wurde das Cleaning mithilfe des Graph Editors in Autodesk Maya durchgeführt. Der Graph Editor stellt Animationsdaten als Kurven dar und ermöglicht die Bearbeitung der Interpolation zwischen einzelnen Keyframes (siehe Abbildung 16) (Autodesk, 2026). Im Rahmen der Mocap-Korrektur wurden Keyframes mit starken Ausschlägen gelöscht oder entlang der Zeitachse horizontal verschoben, um Trackingrauschen zu reduzieren und die Bewegung zu glätten. Diese Methode erwies sich jedoch als zeitaufwendig, da Bewegungen für jedes einzelne Gelenk manuell angepasst werden mussten und die Ursache des Trackingrauschens nicht immer eindeutig identifiziert werden konnte.

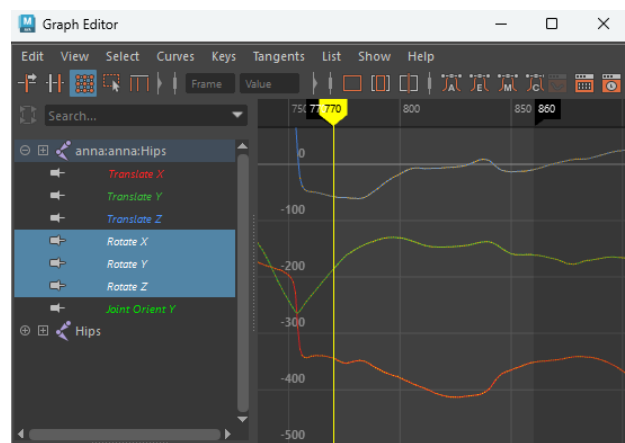


Abbildung 16: Graph Editor Ansicht von Rauchmonster Rotation der Hüfte

Im weiteren Verlauf wurde daher verstärkt mit Cascadeur gearbeitet. Das Animationsprogramm arbeitet mit einem Control Rig, das zur Steuerung der Skelettstruktur des CGI-Charakters dient. Dieses Rig wird automatisch generiert und ermöglicht eine intuitive Bearbeitung der Charakterposen.

Für die Animation standen in Cascadeur mehrere Bearbeitungsmodi zur Verfügung:

- **Auto Posing** optimiert die Körperhaltung automatisch auf Grundlage physikalischer Modelle.
- **Point Controller** dient als zentrales Werkzeug zur manuellen Anpassung von Körperposen.
- **Box Controller** wird vor allem für Detailanimationen, beispielsweise Fingerbewegungen, verwendet.

Der Einsatz der Tools von Cascadeur erleichterte die Steuerung des Charakters erheblich. Zusätzlich unterstützten spezielle Werkzeuge wie der Fulcrum Point, der den Kontakt von Füßen mit dem Boden stabilisiert, den Cleaning-Prozess (siehe Abbildung 17).

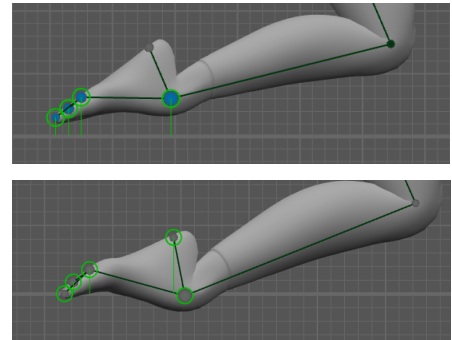


Abbildung 17 von oben: Rechter Fuß vor und nach Fulcrum Point Einsatz

Während des Cleanings wurden zunächst größere Fehler, wie Verdrehungen einzelner Gelenke, korrigiert. Anschließend wurden wichtige Schlüsselposen definiert, um die Animation in eine Keyframe-Animation zu überführen. Dieser Prozess wird als Unbaking bezeichnet.

Beim Unbaking wird eine Motion-Capture-Animation, bei der in jedem Frame ein Keyframe vorhanden ist, in eine reduzierte Keyframe-Struktur überführt. Dadurch wird die Animation übersichtlicher und kann gezielter bearbeitet werden.

Cascadeur bietet hierfür eine automatische Funktion. Im Projekt erwies sich das automatische Ergebnis jedoch als nicht optimal, da teilweise zu viele Keyframes gesetzt wurden oder Schlüsselposen an ungünstigen Zeitpunkten lagen. Daher wurden die Schlüsselposen manuell festgelegt und überflüssige Zwischen-Keyframes entfernt.

Während der Bearbeitung der Bewegungsdaten waren weiterhin einzelne Trackingfehler sichtbar. Die Korrektur dieser Fehler erforderte teilweise einen hohen Zeitaufwand, um Veränderungen an den ursprünglichen Bewegungsdaten möglichst gering zu halten. Dennoch waren die Motion-Capture-Daten in keinem Fall unbrauchbar und konnten vollständig weiterverarbeitet werden.

Zusammenfassend zeigte sich, dass die in den Motion-Capture-Daten vorhandenen Trackingfehler durch geeignete Bearbeitungsschritte effektiv korrigiert werden konnten. Insbesondere durch den Einsatz von Cascadeur ließ sich der Cleaning-Prozess deutlich effizienter gestalten, ohne dabei wesentliche Bewegungsinformationen zu verlieren.

6. Analyse der Motion Capture Aufnahme

Im folgenden Kapitel werden vier ausgewählte Beispielclips aus der Produktion analysiert. Ziel der Analyse ist es, diese Clips anhand der im Kapitel 2.4. erarbeiteten Kriterien auf Bewegungsfreiheit, Kleidungsfreiheit und Qualität der Bewegungsdaten zu untersuchen.

	Beispielclip 1	Beispielclip 2	Beispielclip 3	Beispielclip 4
Blid				
Zeitpunkt	00:00-00:16	00:16-00:17	00:37-00:40	00:40-00:43
Choreographie Beschreibung	Beginn des Tanzes. Rauchmonster baut sich auf.	Tänzerin wird vom Monster gewürgt.	Monster fängt Tänzerin ein.	Monster greift nach der Tänzerin.
Beobachtete Trackingfehler	Starkes Rauschen in den Beinen und Armen	Starkes Rauschen in den Armen	Gelenkverdrehung	Gelenkverdrehung und Armversatz
Mögliche Ursache	Verdeckung	Verdeckung	Unklar	Aufnahmerand

6.1. Beschreibung der Beispielclips

Für die Analyse sind folgende Beobachtungen in den Beispielclips aufgetreten.

Beispielclip 1 zeigt den ersten Shot der Szene. Die Tänzerin sitzt mit verschränkten Armen auf einem Stuhl, während sich hinter ihr das Rauchmonster aufbaut und sie anschließend angreift.

Bei der Analyse der Motion-Capture-Daten zeigte sich in dieser Szene eine vergleichsweise geringe Trackingstabilität. Besonders zu Beginn der Aufnahme war deutliches Bewegungsrauschen in den Beinen des Rauchmonsters sowie in den Armen der Tänzerin zu erkennen (siehe Abbildung 18). Zusätzlich wurde bei beiden Figuren eine Verdrehung der Arme beobachtet, die sich über mehrere Frames erstreckte. Beim

Rauchmonster trat dieser Fehler insbesondere beim Aufstehen im linken Arm auf. Am Ende des Clips trat zusätzlich ein Trackingfehler im rechten Arm des Monsters auf, der teilweise durch die Tänzerin verdeckt wurde.

Ein möglicher Grund für diese Trackingfehler liegt in der Verdeckung einzelner Körperteile. Zu Beginn des Clips wird der Körper vom Monster durch die Tänzerin verdeckt. Am Ende der Szene wird der rechte Arm des Monsters teilweise von der Tänzerin verdeckt. Ein weiterer möglicher Grund für das Rauschen in den Beinen des Rauchmonsters am Anfang der Szene könnte die geringe visuelle Unterscheidbarkeit zwischen Ober- und Unterschenkel sein, da beide Bereiche die gleiche Farbstruktur aufweisen.

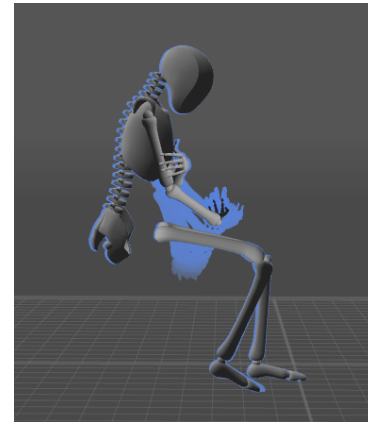


Abbildung 18:
Bewegungsrausch der
Haupttänzerin

Auch bei der Tänzerin könnte die geringe Kontraststruktur des weißen Kostüms zu den Trackingfehlern beigetragen haben. Da sich Arm und Oberkörper visuell nur wenig voneinander unterscheiden, konnte das markerlose Motion-Capture-System Captury Live die genaue Position der Arme nicht durchgehend stabil bestimmen.

In der Nachbearbeitung waren diese Fehler sichtbar und mussten teilweise durch aufwändige Keyframe-Animation korrigiert werden. Die zentralen Bewegungen des Monsters, wie das Aufstehen und das Ausbreiten der Arme, konnten jedoch überwiegend verwendet werden.

In **Beispielclip 2** greift das Rauchmonster die Tänzerin mit einem Würgegriff an, woraufhin die Tänzerin versucht, sich aus diesem Griff zu befreien.

Ähnlich wie in Beispielclip 1 war auch hier eine Instabilität im Tracking des rechten Monsterarms zu beobachten. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Hände der Tänzerin im Motion-Capture-Datensatz teilweise unterhalb der Arme des Monsters positioniert waren, obwohl sie in der realen Aufnahme oberhalb lagen.

Eine weitere Beobachtung betraf das allgemeine Trackingrauschen. Während die Darsteller zu Beginn der Szene noch auf ihren Einsatz warteten und sich kaum bewegten,

war das Rauschen deutlich stärker als während der anschließenden Tanzbewegungen.

Mögliche Ursachen für diese Trackingfehler liegen in der teilweisen Verdeckung der Arme sowie in der Dynamik der Bewegung. Die Fehlpositionierung der Arme könnte durch die Überlagerung der Körpersegmente entstanden sein (siehe Abbildung 19). Das stärkere Rauschen vor Beginn der Bewegung könnte darauf zurückzuführen sein, dass sehr statische Körperposen für das Tracking-System schwieriger zu tracken sind als dynamische Bewegungen.

In der Nachbearbeitung mussten diese Fehler korrigiert werden. Der Korrekturaufwand war jedoch geringer als im ersten Beispielclip, sodass die Bewegungsdaten weitgehend übernommen werden konnten.

Beispielclip 3 zeigt, wie die Tänzerin sich vom Monster losreißt und davonläuft. Kurz darauf wird sie vom Monster eingeholt und gefangen, sodass sie nach hinten fällt, wo sie vom Monster gepackt wird.

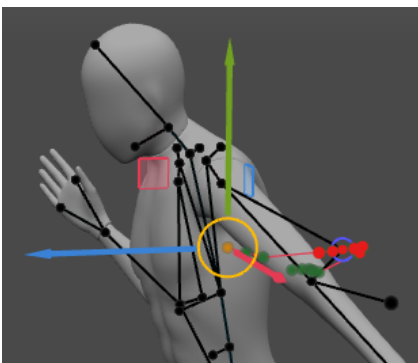


Abbildung 20: Verdrehung im rechten Arm; die versetzten Keyframes sind rot markiert

Neben einem Bewegungsrauschen war bei der Analyse des Beispielclips beim Monster eine Verdrehung des Gelenks im linken Oberarm zu beobachten. Diese Verdrehung trat jedoch nur über wenige Frames (ca. 5-9 Frames) auf und korrigierte sich anschließend selbst.

Die Ursache für diesen Trackingfehler lässt sich nicht eindeutig bestimmen. Möglich ist, dass die Bewegung in diesem Moment für das Tracking-System nicht eindeutig zu interpretieren war. Ebenso könnten die

Lichtverhältnisse im Aufnahmebereich zu einer geringeren Trackingstabilität beigetragen haben. Insgesamt handelt es sich jedoch nur um eine kurze Trackinginstabilität, die vom System im weiteren Verlauf der Bewegung selbst korrigiert wurde.

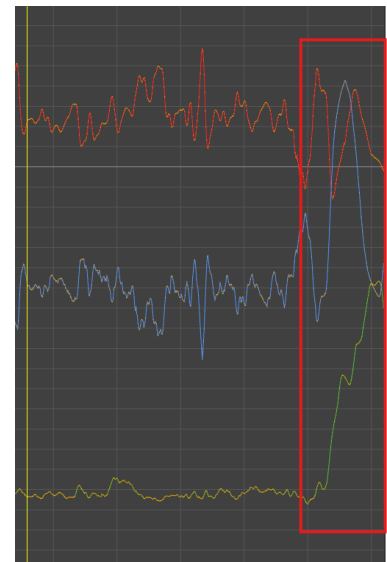


Abbildung 19: Auftretendes Bewegungsrauschen zu Beginn des Videos; der rote Kasten markiert den Start der Bewegung.

In der Nachbearbeitung waren die Trackingfehler zwar sichtbar, konnten jedoch ohne größeren Aufwand korrigiert werden. Dabei wurden die Frames identifiziert, in denen der Fehler auftrat, und die entsprechenden fehlerhaften Bewegungsdaten entfernt.

In der Szene von **Beispielclip 4** fallen die Tänzerin und das Monster nach vorne und führen anschließend eine Drehbewegung auf dem Boden aus. Danach streckt die Tänzerin ihre Hand nach vorne aus. Gleichzeitig bewegt sich das Monster ebenfalls nach vorne und erfasst die hintere Hand der Tänzerin.

Bei der Analyse der Motion-Capture-Daten wurden kleinere Verdrehungen in den Armen festgestellt, die sich jedoch nach wenigen Frames wieder korrigierten. Außerdem war der Arm des Monsters leicht versetzt (siehe Abbildung 21). Ein weiterer Trackingfehler war in der Position der Beine zu erkennen, da diese teilweise leicht über dem Boden schwebten und keinen direkten Bodenkontakt hatten.

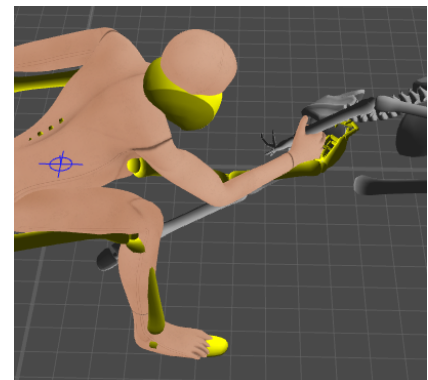


Abbildung 21: Bearbeitete Bewegungsdaten Orange hervorgehoben; Originale Bewegungsdaten vom Rauchmonster Gelb hervorgehoben;

Der Grund für diese Trackingfehler lässt sich wie im Beispielclip 3 nicht eindeutig bestimmen. Eine mögliche Erklärung könnte die ungleichmäßige Ausleuchtung des Raumes sein. Zudem fand die Bewegung am Rand des Aufnahmebereichs statt, wodurch die Trackingqualität möglicherweise reduziert wurde.

In der Nachbearbeitung konnten diese Fehler korrigiert werden. Die Verdrehungen der Arme wurden durch das Entfernen der fehlerhaften Bewegungsdaten in den entsprechenden Frames behoben. Darüber hinaus konnte durch die Verwendung von Cascadeurs Fulcrum Point der Kontakt der Füße zum Boden wiederhergestellt werden.

6.2. Aufnahmebedingungen

Für die Aufnahmen galten die im Kapitel 3.2. beschriebenen Aufnahmebedingungen. Der gleichmäßige Abstand der Kameras untereinander wurde eingehalten und der Neigungswinkel wurde erfüllt. Jedoch befanden sich 7 von 10 Kameras nicht in der vorgesehene Kamerahöhe und waren ca. 30 cm niedriger als die vorgegebene Höhe. Darüber hinaus erfüllte die Beleuchtung des Raumes nicht die optimalen

Voraussetzungen, da diese nicht gleichmäßig verteilt war. Dies führte zu einer reduzierten Trackingqualität, was bereits während der Aufnahme erkennbar war.

6.3. Bewegungsfreiheit

In Kapitel 2.4 wurde herausgearbeitet, dass markerloses Motion Capture im Vergleich zu markerbasierten Verfahren eine größere Bewegungsfreiheit ermöglicht. Diese ergibt sich insbesondere daraus, dass keine physischen Marker verwendet werden, die während der Aufnahme beschädigt werden oder abfallen können.

Dieser Vorteil konnte sowohl in der Vorbereitung als auch während der Aufnahmen des Filmprojekts *Clouded Mind* beobachtet werden. Die Choreografin verfügte über ein hohes Maß an kreativer Gestaltungsfreiheit, da weder Kleidung noch Bewegungsabläufe durch technische Einschränkungen limitiert waren. Während der Aufnahmen konnten sämtliche Tanzbewegungen vom Motion-Capture-System Captury Live erfasst werden. Auch bei komplexeren Bewegungsabläufen traten keine Einschränkungen auf, sodass die Choreografie nicht an die technischen Gegebenheiten angepasst werden musste.

Dennoch verlief die Aufnahme nicht vollständig fehlerfrei. Die aufgetretenen Trackingfehler werden in Kapitel 6.5 („Trackingqualität“) näher erläutert.

6.4. Einfluss der Kleidung

Ein weiterer Vorteil, der in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, ist die Flexibilität in der Kleidungswahl. Durch diese Flexibilität konnte die Haupttänzerin während der Aufnahme des Monsters direkt in ihrem Kostüm mit aufgezeichnet werden. Dies erwies sich in der Nachbearbeitung als hilfreich, da die Tänzerin als visuelle Referenz für die Animation genutzt werden konnte. Im vierten Beispielclip wurde diese Referenz beispielsweise verwendet, um abzuschätzen, an welcher Position sich der Hand des Rauchmonsters befinden müsste, wenn dieses nach der Tänzerin greift. Außerdem wurde die Tänzerin zu Beginn des Projekts als Kollisionskörper verwendet, um in Beispielclip 2 eine natürlichere Volumensimulation des Rauchmonsters zu erzeugen.

Des Weiteren konnte im Projekt bestätigt werden, dass die Wahl der Kleidung einen deutlichen Einfluss auf die Trackingqualität hat. Während der Aufnahme konnten klare Unterschiede zwischen der Trackingqualität der Haupttänzerin und der Darstellerin des Rauchmonsters festgestellt werden. Die Darstellerin des Monsters trug speziell für die

Motion-Capture-Aufnahme ausgewählte Kleidung mit kontrastreichen Farben an Körper, Unterarmen und Beinen. Die Haupttänzerin hingegen trug ein einfarbiges Kostüm mit geringem Kontrast.

Diese geringe Kontraststruktur führte dazu, dass die Motion-Capture-Aufnahmen der Tänzerin häufiger Trackingfehler aufwiesen. Besonders deutlich wurde dies in Beispielclip 1. In dieser Szene lag der Arm der Tänzerin eng am Rumpf an, während beide Körperteile eine ähnliche weiße Farbgebung hatten. Dadurch konnte das System die genaue Position des Arms nicht zuverlässig bestimmen. Dies führte zu starken Positionsschwankungen, bei denen sich der Arm deutlich nach oben und unten bewegte.(Bild)

Wenn der Körper der Haupttänzerin stärker ausgestreckt war – wie in Beispielclip 3 und Beispielclip 4 – war dieses Rauschen deutlich geringer wahrzunehmen. Im Vergleich zur Tänzerin war die Trackingqualität der Darstellerin des Monsters insgesamt stabiler. Dennoch konnten auch bei dieser Figur vereinzelt Fehler in der Armposition beobachtet werden.

6.5. Trackingqualität

Ein Nachteil von markerlosem Motion Capture, der im Kapitel 2.4. erarbeitet wurde, ist die fehlerhafte Trackingaufnahme. Diese konnte auch im Projekt bestätigt werden. Ein gewisser Qualitätsverlust markerloser Motion-Capture-Systeme war in allen Beispielclips erkennbar. Dieser war jedoch nie so stark ausgeprägt, dass die aufgezeichneten Bewegungen nicht mehr verwendet werden konnten. Die beobachteten Fehler äußerten sich hauptsächlich in Form von Bewegungsrauschen, Verdrehungen einzelner Gelenke sowie Positionsverschiebungen einzelner Körpersegmente.

Bewegungsrauschen trat in allen Beispielclips auf, beeinträchtigte jedoch insbesondere die Animation in Beispielclip 1. In der Bearbeitung musste dieser Beispielclip durch Keyframe-Animation korrigiert werden. Außerdem war in Beispielclip 2 bei einer statischen Körperhaltung ein starkes Rauschen zu beobachten, welches sich mit Beginn der dynamischen Tanzbewegungen reduzierte. Dies deutet darauf hin, dass langsame oder statische Bewegungen stärker von Trackingrauschen betroffen sein können als dynamische Bewegungsabläufe.

Darüber hinaus wurden in allen Beispielclips Verdrehungen einzelner Gelenke festgestellt. Traten diese nur über wenige Frames auf, wie in Beispielclip 2, 3 und 4, konnten sie im Rahmen der Nachbearbeitung vergleichsweise einfach korrigiert werden. Bei länger anhaltenden Fehlern, wie in Beispielclip 1, war hingegen eine aufwendigere manuelle Neupositionierung der Gelenke erforderlich.

Zusätzlich wurden Positionsverschiebungen einzelner Körpersegmente beobachtet. Diese traten insbesondere in den Beispielclips 1, 2 und 4 auf und erforderten eine Korrektur der Gelenkpositionen.

6.6. Ergebnis der Analyse

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass markerlose Motion-Capture-Systeme eine hohe Bewegungsfreiheit ermöglichen, jedoch weiterhin empfindlich auf ungünstige Lichtverhältnisse, geringe Kontraste in der Kleidung sowie Verdeckungen von Körperteilen reagieren. Trotz der beobachteten Trackingfehler konnten die meisten Bewegungsdaten mit einigem Korrekturaufwand in der Nachbearbeitung verwendet werden.

7. Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, das Potenzial von markerlosem Motion Capture für den Einsatz in hybriden Filmproduktionen zu untersuchen. Dabei wurde festgestellt, welche Möglichkeiten und Herausforderungen sich beim Einsatz dieser Technologie im Produktionsprozess ergeben.

Das Ergebnis zeigt, dass die markerlose Methode eine praktische Lösung für Bewegungsaufnahmen darstellt. Insbesondere stellen die höhere Bewegungsfreiheit und die geringeren Einschränkungen beim Kostüm sowie die einfachere Bedienung Vorteile gegenüber den markerbasierte Methode dar. Diese Eigenschaften können für Film- und Gameproduktionen neue kreative Möglichkeiten eröffnen.

Die praktische Arbeit mit dem System Captury Live hat gezeigt, dass sowohl der Aufbau als auch die Kalibrierung des Systems relativ unkompliziert umgesetzt werden können. Zudem ermöglichte die Echtzeitvisualisierung während der Aufnahmen eine direkte Kontrolle der Motion-Capture-Daten und erleichterte das frühzeitige Erkennen möglicher Trackingfehler.

Gleichzeitig wurden im praktischen Einsatz auch Einschränkungen deutlich. Insbesondere die Lichtverhältnisse am Set hatten Einfluss auf die Tracking-Qualität. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Integration der Motion-Capture-Technologie in Drehproduktionen zusätzliche organisatorische und technische Anforderungen mit sich bringt. Dazu gehört beispielsweise eine engere Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Abteilungen, etwa zwischen Kamera, Kostüm und Motion-Capture-Team, um technische und gestalterische Anforderungen miteinander zu vereinbaren.

Die Analyse der Beispielaufnahmen bestätigte, dass markerlose Systeme insbesondere bei Bewegungsfreiheit und Kostümgestaltung Vorteile bieten. Gleichzeitig wurden jedoch auch Qualitätsmängel sichtbar, insbesondere hinsichtlich der Stabilität und Präzision der erfassten Bewegungsdaten. Dies erschwert den Bearbeitungsprozess, insbesondere Fehler zu löschen ohne die Bewegungsdaten zu verlieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Markerless Motion Capture im Rahmen des Projekts „Clouded Mind“ eine hilfreiche und praktikable Methode darstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Technologie bereits heute sinnvoll in hybriden Filmproduktionen eingesetzt werden kann, auch wenn weiterhin qualitative Einschränkungen bestehen. Mit weiteren technologischen Entwicklungen im Bereich markerloser Motion-Capture-Verfahren, wie beispielsweise dem System MAMMA, das eine verbesserte Trackingqualität verspricht, und der Entwicklung von Deep Learning-gestützten Trackingverfahren ist jedoch davon auszugehen, dass markerlose Motion-Capture-Systeme in Zukunft eine noch größere Rolle in der Filmproduktion einnehmen werden.

Literaturverzeichnis

Advanced Realtime Tracking (o. J.). Marker. Advanced Realtime Tracking GmbH & Co. KG. Abgerufen 09.02.2026, von <https://ar-tracking.com/de/product-program/markers>

Baker, T. (2020). „The History of Motion Capture Within The Entertainment Industry.“ Bachelor Thesis, Metropolia University of Applied Sciences. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202005057375>.

Boesch, G. (2021). „Deep neural network: The 3 popular types (MLP, CNN and RNN)“. Viso.Ai. Abgerufen 09.02.2026, von <https://viso.ai/deep-learning/deep-neural-network-three-popular-types/>

Captury (o. J.). Captury.com. Abgerufen 09.02.2026, von <https://captury.com/real-time-processing/#live>

Captury Technische Dokumentation (o. J.). Captury.com. Abgerufen 19.03.2026, von doc.captury.com/CapturyLive/

Captury (2025). Captury.helpscoutdocs.com. Abgerufen 19.03.2026, von <https://captury.helpscoutdocs.com/article/16-what-to-wear>

Cuevas-Velasquez, H. u. a. (2025) „MAMMA: Markerless & Automatic Multi-Person Motion Action Capture“. doi.org/10.48550/ARXIV.2506.13040.

Daemen, J. u. a. (2013). „Markerless Actor Tracking for Virtual (TV) Studio Applications“, (S. 790–796). Aizuwakamatsu, Japan: IEEE. doi.org/10.1109/ICAWSST.2013.6765544.

Das, K. u. a. (2023). „Comparison of Markerless and Marker-Based Motion Capture Systems Using 95% Functional Limits of Agreement in a Linear Mixed-Effects Modelling Framework.“ Scientific Reports 13, Nr. 1: 22880. doi.org/10.1038/s41598-023-49360-2.

Elhayek, A. (2015). „Marker-Less Motion Capture in General Scenes with Sparse Multi-Camera Setups“. doi.org/10.22028/D291-26634.

Fleischer Studios (o. J.). „100 Years of Rotoscoping!“. Abgerufen 13.02.2025, von <https://www.fleischerstudios.com/mRotoscope.html>

Flückiger, B. (2023). „Visual Effects: Filmbilder aus dem Computer.“ Zürcher Filmstudien 18. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Schüren Verlag.

Gleicher, M., und Ferrier, N. (2002). „Evaluating Video-Based Motion Capture,” 75–80. Geneva, Switzerland: IEEE Comput. Soc. doi.org/10.1109/CA.2002.1017510.

Glovart, M. (o. J.). „Animiere die Realität mit der Rotoskopie.“. Adobe Blog. Abgerufen 22.04.2025, von <https://www.adobe.com/at/creativecloud/video/discover/roto-scoping-animation.html>

Gray, A. (2014). „A Brief History of Motion-Capture in the Movies“. Abgerufen 16.03.2026, von <https://www.ign.com/articles/2014/07/11/a-brief-history-of-motion-capture-in-the-movies>

Harsted, S. u. a. (2019) „Concurrent validity of lower extremity kinematics and jump characteristics captured in pre-school children by a markerless 3D motion capture system“, *Chiropractic & Manual Therapies*, 27(1), (S. 39). doi.org/10.1186/s12998-019-0261-z

Jürgens, S. u. a. (2020). „Designing Glitch Procedures and Visualisation Workflows for Markerless Live Motion Capture of Contemporary Dance,” (S.1–8). Jersey City/Virtual NJ USA: ACM. doi.org/10.1145/3401956.3404225.

Kumar, A. (2022). „Beginning VFX with Autodesk Maya: Create Industry-Standard Visual Effects from Scratch“. Berkeley, CA: Apress. doi.org/10.1007/978-1-4842-7857-4.

Kitagawa, M., und Windsor, B. (2008). „MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture“ (1st ed.). Routledge. doi.org/10.4324/9780080877945.

Lai, Z., und Zhao, Q. (2024). "VRA-L: A Real-Time System for Generating Expressive Avatar Animations and Object Detection Based on RGB Cameras and Monocular Videos," (S.292–298). Guangzhou China: ACM. doi.org/10.1145/3700906.3700954.

MotionAnalysis (2023). „What is optical motion capture?“ Motionanalysis.com. Abgerufen 09.02.2026, von <https://www.motionanalysis.com/biomechanics/what-is-optical-motion-capture/>

Nagorny, P. u. a. (2025). „A Comprehensive Review of Real-Time Multi-View Multi-Person Markerless Motion Capture." *ACM Computing Surveys* 58, Nr. 3. (S. 1–34). doi.org/10.1145/3757733.

OptiTrack (o. J.). Optitrack.com. Abgerufen 9. Februar 2026, von <https://docs.optitrack.com/motive/markers>

Rhodin, H. u. a. (2016). "General Automatic Human Shape and Motion Capture Using Volumetric Contour Cues". doi.org/10.48550/ARXIV.1607.08659.

Robinson, J. (2014). „The Art of Motion Capture in Film“. Blogartikel. Abgerufen 17.05.2025, von https://postprolist.com/article/motion-capture-technology?no_frame=1.

Rotten Tomatoes (2018) „Weta Digital Meets Tolkien: The Making of ‘The Lord of the Rings‘“. YouTube. Abgerufen 09.02.2026, von <https://www.youtube.com/watch?v=dg0XTzG1v98>, ab 04:33ff.

Sharma, A. (2013). „Motion Capture Process, Techniques and Applications“. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 1(4), 251–257.

Schneider, D. (2021). „Visual hull“. In *Computer Vision* (S. 1363–1366). Springer International Publishing. doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_211.

Sito, T. (2013). „Moving Innovation: A History of Computer Animation.“ Cambridge (Mass.): MIT press.

Stoll, C. u. a. (2011). „Fast articulated motion tracking using a sums of Gaussians body model“, (S. 951–958.). doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126338.

Sturman, D. J. (1994). „A brief history of motion capture for computer character animation“. SIGGRAPH94, Course 9. Abgerufen 09.02.2026, von https://education.siggraph.org/static/HyperGraph/animation/character_animation/motion_capture/history1.htm.

Thomas, Frank, and Ollie Johnston. „The Illusion of Life: Disney Animation.“ 1. Hyperion ed. New York, NY: Hyperion, 1995.

Tigidam, P. (2025). „Sony Music Brings the Future of Virtual Concerts to Fortnite with Markerless Mocap“. Move AI Blog. Abgerufen 09.02.2026, von <https://www.move.ai/blog/sony-music-brings-the-future-of-virtual-concerts-to-fortnite-with-markerless-mocap>

VisCircle (2018). Einsteigeruide: Was versteht man eigentlich unter Motion Capture? 3D Konfigurator 3D Animationen 3D Renderings; VisCircle GmbH. Abgerufen 09.02.2026, von <https://viscircle.de/einsteigeruide-was-versteht-man-eigentlich-unter-motion-capture-2/>

Wren, C.R. u. a. (1997). „Pffinder: Real-Time Tracking of the Human Body.“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19, Nr. 7: S. 780–785. <https://doi.org/10.1109/34.598236>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Smarthistory. (o. J.). Étienne-Jules Marey, Joinville Soldier Walking. Abgerufen 19.03.2026, von <https://smarthistory.org/marey-joinville-soldier-walking/>

Abbildung 2: Wikipedia. (o. J.). „US patent 1242674 figure 3“ [Abbildung]. Abgerufen 19.03.2026, von https://de.wikipedia.org/wiki/Rotoskopie#/media/Datei:US_patent_1242674_figure_3.png

Abbildung 3: Flückiger, B. (2023). „Visual Effects: Filmbilder aus dem Computer.“ Zürcher Filmstudien 18. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Schüren Verlag.

Abbildung 4: Gray, A. (2014). „A Brief History of Motion-Capture in the Movies“. Abgerufen 16.03.2026, von <https://www.ign.com/articles/2014/07/11/a-brief-history-of-motion-capture-in-the-movies>

Abbildung 5: fxguide. (o. J.). Head Mounted Sci-Tech Oscars. Abgerufen 19.03.2026, von <https://www.fxguide.com/featured/head-mounted-sci-tech-oscars/>

Abbildung 6: Wren, C.R. u. a. (1997). „Pffinder: Real-Time Tracking of the Human Body.“ IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 19, Nr. 7: S. 780–785. <https://doi.org/10.1109/34.598236>.

Abbildung 7: Stoll, C. u. a. (2011). „Fast articulated motion tracking using a sums of Gaussians body model“, (S. 951–958.). doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126338.

Abbildung 8: Animation World Network (AWN). (o. J.). „Marvel: Behind the Real-Time Set Visualization, Digital Hulk and Thanos“. Abgerufen 19.03.2026, von <https://www.awn.com/vfxworld/marvel-behind-real-time-set-visualization-digital-hulk-and-thanos>

Abbildung 9: Deep Learning Boesch, G. (2021). „Deep neural network: The 3 popular types (MLP, CNN and RNN)“. Viso.Ai. Abgerufen 09.02.2026, von <https://viso.ai/deep-learning/deep-neural-network-three-popular-types/>

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich an alle Personen bedanken, die mich während der gesamten Projektlaufzeit unterstützt haben.

Zunächst bedanke ich mich bei meinen Prüfern, Prof. Dipl.-Reg. Sebastian Grobler (Erstprüfer) und Jennifer Meier (Zweitprüferin), für ihre Begleitung und ihr konstruktives Feedback.

Außerdem möchte ich mich bei Prof. Rico Dober bedanken, der mich in der Anfangsphase des Projekts betreut und mir wertvolle Impulse gegeben hat.

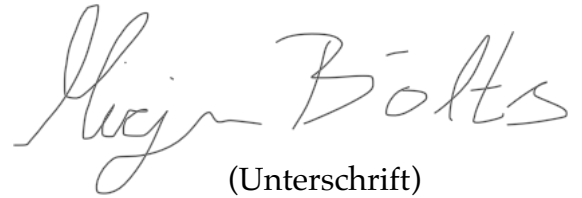
Ein herzliches Dankeschön geht auch an alle Mitwirkenden des Filmprojekts. Insbesondere danke ich Vanessa Struck für die Choreografie des Tanzfilms und die gemeinsame Einstudierung mit Anna Frigge, sowie Alex Preuß für die Kameraführung.

Abschließend danke ich von Herzen meinen Freunden und meiner Familie, die meine Arbeit Korrektur gelesen und mich in jeder Phase unterstützt haben.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich das ich die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten fremden Quellen entnommen wurden, sind als solche unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hameln, 20.03.2026


(Unterschrift)