

Evaluierung von Wärmefußabdrücken - Messbare Nachhaltigkeit im Eiswürfelmodell-

Autoren:

Prof. Dr. Manfred Sietz, B. Eng. Philipp Heydel, B. Eng. Christian Rikus, B. Eng. Christian Stumpf*

*Hochschule OWL, FB 8, An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter

Stichwörter

Nachhaltigkeitsmanagement, Wärmefußabdruck, Ressourcen- und Energieeffizienz, Klimawandel, Wirkungsgrad, Entropiezunahme, Eiswürfelmodell

These Entropie:

Jede wirtschaftliche, private und ökologische Aktivität, sogar die Unterhaltung sozialer Netzwerke und soziale Dienstleistungen korrelieren mit einem Energieverbrauch und durch die freigesetzte und damit ungenutzte Abwärme mit einer Entropieerhöhung. Jegliche Aktivität/jegliches Leben unterliegt dem Energieverbrauch und der Entropieerhöhung. Die Entropiezunahme ist irreversibel, das bedeutet, Energie die einmal ungenutzt in Wärme umgewandelt wurde, kann nicht wieder vollständig in den Ursprungszustand überführt werden.

Ein einmal geschmolzener Eiswürfel kann nur durch Energiezufuhr wieder zum Eiswürfel „gemacht“ werden.



Abbildung 1: Ein 10x10x10cm großer Eiswürfel

Um den in Abb. 1 dargestellten 10x10x10cm großen Eiswürfel durch seine Abwärme zu schmelzen, fährt ein durchschnittlicher Mittelklassewagen nur ca. 160m.

Einleitung

Seit der Industriellen Revolution hat der technische Fortschritt viele Bereiche unseres Lebens wesentlich verändert. Neben dem Effekt der Konsumgesellschaft durch eine Vielzahl von kostengünstigen Produkten und einem flächendeckendem Wohlstand in der Westlichen Hemisphäre hat zudem eine Verbesserung der Lebensumstände das Durchschnittsalter der Menschheit stark ansteigen lassen [1]. Der globale Verbrauch an Ressourcen ist dadurch enorm verstärkt worden und erfordert eine kreislaufwirtschaftsfähige Produktion der Güter und Maßnahmen gegen potenziellen Überkonsum.

All dies ist erst durch die Entdeckung und Ausbeutung von fossilen Energieträgern im industriellen Maßstab möglich geworden. Durch intensive Nutzung neigen sich die Vorräte dieser und anderer wertvollen Ressourcen dem Ende zu, wodurch der begrenzte Vorrat an in Arbeit umwandelbarer Energie kontinuierlich abnimmt [2]. Die Konsequenzen daraus sind heutzutage offensichtlich und haben einen unumkehrbaren Klimawandel zur Folge. Neben dem global zu verzeichnenden Anstieg der durchschnittlichen Temperatur an der Erdoberfläche [3], kann eine Zunahme von extremen Wetterereignissen beobachtet werden, die unter anderem der Zunahme des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre geschuldet ist [4]. Über den zu erwartenden Primärenergieverbrauch und die zugehörigen Wärmemengen rechnet Bennewitz vor [12], dass zwischen dem Jahr 2000 und 2100 die Durchschnittstemperatur der Atmosphäre um ca. 6°C ansteigen wird.

Der Klimawandel ist die Folge aus einem stetig wachsenden Abwärmeeintrag in das System Erdatmosphäre/Erdoberfläche in immer kürzeren Zeitabständen in Kombination mit einem immer größer werdenden Zeitraum für das Zurückhalten von Wärme durch klimarelevante Gase, wie z.B. das CO₂.



Gleichung 1: Verbrennungsgleichung fossiler Energieträger (Methan stellvertretend für alle fossilen Energieträger)

In Verantwortung für kommende Generationen und die Natur ist ein Umdenken zwingend erforderlich. Das Stichwort dazu lautet Nachhaltigkeit. Neben sozialer Gerechtigkeit und der Recyclebarkeit von Produkten, muss hier vor allem sowohl die Ressourcen- und Energieeffizienz im wirtschaftlichen und privaten Bereich als auch die Verlangsamung des Klimawandels im Vordergrund stehen.

Nachhaltig ist alles, was den Klimawandel verlangsamt und uns besser auf die Folgen vorbereitet.

Jeder Prozess oder Vorgang in der Wirtschaft, den privaten Haushalten und der Mobilität ist mit einem Energieverbrauch verbunden. Bedingt durch den Wirkungsgrad wird in Folge von Reibungs-, Umwandlungs- und anderen Verlusten ein Großteil der eingesetzten Energie als ungenutzte Abwärme frei und gelangt somit in die Atmosphäre (vgl. Abb.2). Diese Abwärme lässt sich nicht mehr vollständig in sinnvolle Arbeit umwandeln. Ein Prozess mit einem hohen Wirkungsgrad produziert wenig Abwärme und umgekehrt. Bei einer schlechten Energieumwandlung ist die Energie- und Ressourceneffizienz gering und die Entropie groß [10]. Da die Abwärme messbar und klimawirksam ist, kann dieser Wärmestrom in die Atmosphäre näherungsweise zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von energieverbrauchenden Prozessen, in Form eines Wärmefußabdruckes, herangezogen werden.

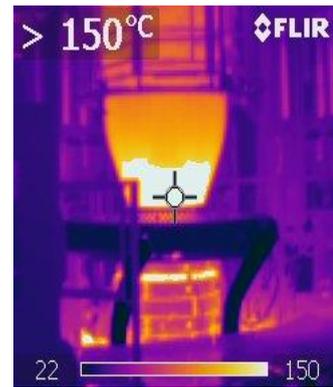


Abbildung 2:
Wärmebildaufnahme einer
Blasextrusion in einem
Kunststoffunternehmen

Durch den Wärmefußabdruck kann Abwärme in Form einer spezifischen Kennzahl anschaulich dargestellt werden. Unter dem Begriff Wärmefußabdruck verstehen wir die Wärmefreisetzung, die direkt oder indirekt durch Abwärme bei der Nutzung von Energie entsteht.

Der Wärmefußabdruck ist der messbare Erkenntnisstand über die jährliche Wärmemenge, die ungenutzt in die Erdatmosphäre gelangt und hierbei die Strahlungs- und Wärmebilanz des Systems Erdoberfläche/Atmosphäre „nachhaltig“ beeinflusst.

Er gibt somit Aufschluss über die Ressourcen- bzw. Energieeffizienz eines Verbrauchers, sowohl unternehmerisch als auch privat, und stellt damit seine Klimarelevanz dar.

Berechnungsansatz des Wärmefußabdruckes

Die Berechnung des Wärmefußabdruckes basiert auf einem modellhaften Ansatz, bei dem die jährlich produzierte Abwärme eines Verbrauchers für das Schmelzen eines Eiswürfels mit einer spezifischen Kantenlänge unter festen Randbedingungen herangezogen wird. Dadurch ergibt sich visuell die Möglichkeit, industrielle und private Verbraucher untereinander zu vergleichen und die Verantwortlichkeit eines jeden Verbrauchers am Klimawandel, im Sinne des Verursacherprinzips, durch ein einfaches Modell darzustellen. Die für das Schmelzen eines Eiswürfels betrachteten Wärmeübergänge beziehen sich jeweils auf die spezifischen Temperaturen der stattfindenden Prozesse.

Die Grundfläche des berechneten Eiswürfels entspricht symbolisch der Grundfläche eines Fußabdrucks. Je größer die Kantenlänge des Eiswürfels, desto größer ist auch der Wärmefußabdruck und die daraus resultierende „fehlende Nachhaltigkeit“ bzw. die Geschwindigkeitszunahme des anthropogenen Klimawandels (erhöhte Entropiezunahme).

Zur Veranschaulichung dieses Prinzips sind die bereits bekannten Bezugsgrößen des CO₂- und des Wasserfußabdrucks herangezogen worden. Je größer der Wärmefußabdruck, desto größer das Eisvolumen, das durch die daraus folgende Temperaturerhöhung in der Atmosphäre schmilzt.

Tabelle 1: Veranschaulichung Berechnungsmodell Eiswürfel

Berechnungsansatz	Bezugsfläche
CO ₂ -Fußabdruck	Ausgleichsfläche Wald
Wasserfußabdruck	Grundwasserneubildungsrate einer Fläche
Wärmefußabdruck	Grundfläche eines Eiswürfels

Das Produkt der verbrauchten Energiemenge und dem spezifischen Gesamtwirkungsgrad des Verbrauchers ergibt die relevante Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt (siehe Gl. 2). Diese relevante Energie setzt sich aus fossiler Energie und erneuerbarer Energie zusammen und ist damit die Summe aus beiden. Dabei wird der Anteil an Erneuerbaren Energie am Strommix in Deutschland berücksichtigt [5].

Der Anteil an fossiler Energie berechnet sich aus dem Energieverbrauch an Strom, multipliziert mit 78,1 % fossilem Anteil am gegenwärtigen Strommix und sonstigem fossilen Energieverbrauch, wie z.B. für Heizzwecke, für den Fuhrpark und die An- und Abfahrt der Mitarbeiter (siehe Gl. 3). Die fossile Energie geht bei diesem Ansatz im vollen Umfang in die Gleichung ein.

Der Anteil an Erneuerbarer Energie errechnet sich aus dem Energieverbrauch, multipliziert mit 21,9 % erneuerbarem Anteil am gegenwärtigen Strommix (siehe Gl. 4).

$$Q_{relevant} = (Q_{fossil} + Q_{regenerativ}) * 3.600 \text{ s} * \eta_{spezifisch} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$Q_{fossil} = Q_{gesamt} * 78,1 \% + Q_{sonstiges} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$Q_{regenerativ} = Q_{gesamt} * 21,9 \% \quad (\text{Gl. 4})$$

$Q_{relevant}$ = relevante Energie zum Schmelzen des Eiswürfels [kJ]

Q_{fossil} = Anteil an fossiler Energiemenge [kWh]

$Q_{regenerativ}$ = Anteil an erneuerbarer Energiemenge [kWh]

$Q_{sonstiges}$ = Sonstiger fossiler Energieverbrauch [kWh]

$\eta_{spezifisch}$ = spezifischer Gesamtwirkungsgrad des Verbrauchers [-]

Dividiert man den relevanten Energieverbrauch durch das Produkt aus Dichte und Schmelzenthalpie des Eises, erhält man das Volumen des spezifischen Eiswürfels, der durch die jährlich freigesetzte Abwärme schmelzen würde. Randbedingung sind hierbei ein idealisierter und homogener Eiswürfel bei einer Umgebungstemperatur von $T = 0^\circ\text{C}$ (s. Gl 5). Aus dem ermittelten Volumen errechnet sich über die dritte Wurzel die Kantenlänge des Würfels (s. Gl. 6).

$$V_{Eis} = \frac{Q_{relevant}}{(\rho_{Eis} * h)} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$l_{Eiswürfel} = \sqrt[3]{V_{Eis}} \quad (\text{Gl. 6})$$

$Q_{relevant}$ = relevante Energie zum Schmelzen des Eiswürfels [kJ]

ρ_{Eis} = Eisdichte bei 0°C mit 916,7 kg/m³

h = Schmelzenthalpie des Eises mit 333,5 kJ/kg

V_{Eis} = Volumen des Eiswürfels [m³]

$l_{Eiswürfel}$ = Kantenlänge des Eiswürfels [m]

Beispiele zur Berechnung des Wärmefußabdruckes

Zur Verdeutlichung des Rechenweges bei der Ermittlung des Wärmefußabdruckes wird dieser exemplarisch am Beispiel eines Unternehmens der Kunststoffbranche sowie eines Vierpersonenhaushalts, Reihenendhaus und zwei PKWs, durchgeführt. Die Basisinformationen für das betrachtete Unternehmen und den betrachteten Haushalt für die Verbräuche im Jahr 2012 können aus der Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Basisinformationen für die Rechenbeispiele

	Unternehmen	Privathaushalt
Mitarbeiteranzahl/Bewohner	367	4
Strom	30.159.169 kWh	5.000 kWh
Gas	4.567.754 kWh	19.500 kWh
Treibstoffverbrauch Fuhrpark/PKW	550.567 kWh	30.000 kWh
An- und Abfahrt der Mitarbeiter	220.155 kWh	-
Spezifischer Wirkungsgrad	20 %	30 %

Der spezifische Wirkungsgrad auf Basis der gewichteten Teilwirkungsgrade beträgt für den Vierpersonenhaushalt, aufgrund einer anzunehmenden höheren energetischen Ausnutzung 30 %.

Der Treibstoffverbrauch des Fuhrparks, der Mitarbeiter und der Hausbewohner errechnet sich über die verbrauchte Menge und den durchschnittlichen Energiegehalt des Treibstoffs. Die Informationen über den Treibstoffverbrauch des Fuhrparks sind vom Unternehmen her gegeben. Über die jährliche Fahrleistung und einen angenommenen Durchschnittsverbrauch von 7 L/100 km errechnet sich der Treibstoffverbrauch der Mitarbeiter und der Hausbewohner.

Der spezifische Wirkungsgrad des betrachteten Verbrauchers ergibt sich aus der Summe der gewichteten Teilwirkungsgrade. Aus der Energiebilanz des Kunststoffunternehmens ergibt sich für die Produktion ein Verbrauchsanteil von 73 %. Dieser Anteil wird vollständig als Abwärme an die Umgebung abgegeben, da der zuvor erhitzte Kunststoff zur weiteren Verarbeitung wieder auf Raumtemperatur abgekühlt werden muss (s. Abb. 2). Unter der Berücksichtigung, dass im restlichen Betrieb ebenfalls Abwärme anfällt, ergibt sich für den gesamten Betrieb ein Abwärmeanteil von 80 % des Gesamtenergieverbrauchs.

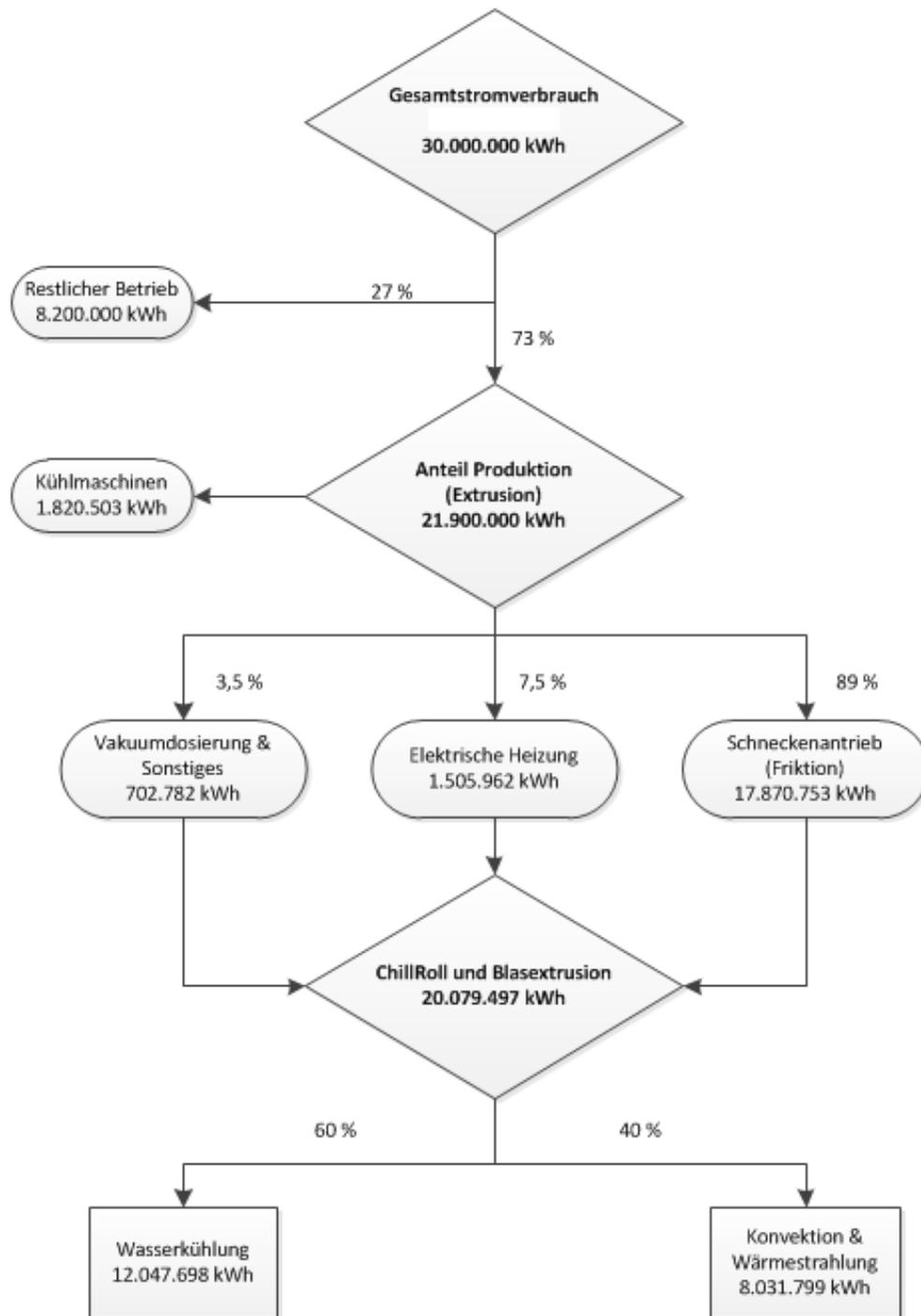


Abbildung 3: Energiebilanz Kunststoffunternehmen (2012) [6, 7]

Rechenweg für das Kunststoffunternehmen

Der Anteil an fossiler Energie berechnet sich aus dem fossilen Anteil des verbrauchten Stroms, dem verbrauchten Gas, dem verbrauchten Diesel des unternehmenseigenen Fuhrparks und dem Benzin- bzw. Dieserverbrauch der Mitarbeiter für die An- und Abfahrt zur Arbeitsstelle (s. Gl. 3):

$$Q_{fossil} = 30.159.169 \text{ kWh} * 78,1 \% + 4.567.754 \text{ kWh} + 550.567 \text{ kWh} + 220.155 \text{ kWh} \\ = 28.892.788 \text{ kWh}$$

Hiernach ergibt sich ein Verbrauch an fossiler Energie in Höhe von 28.892.788 kWh.

Der Anteil der erneuerbaren Energie ergibt sich aus dem Anteil der Regenerativen Energie am Strommix der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2012 (s. Gl. 4):

$$Q_{regenerativ} = 30.159.169 \text{ kWh} * 21,9 \% = 8.776.318 \text{ kWh}$$

Für den Stromverbrauch des Unternehmens ergibt sich somit ein Anteil von 8.776.318 kWh am gesamten Stromverbrauch.

Die Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt, errechnet sich aus nachstehendem Ansatz, wobei der Gesamtwirkungsgrad des Unternehmens mit 20 % angesetzt wird (s. Gl. 2):

$$Q_{relevant} = (28.892.788 \text{ kWh} + 8.776.318 \text{ kWh}) * 3.600 \text{ s} * 0,8 = 10,8 * 10^{10} \text{ kJ}$$

Für die relevante Energie ergibt sich ein Wert von $10,8 * 10^{10} \text{ kJ}$.

Unter Verwendung der zuvor rechnerisch ermittelten Werte ergeben sich somit das Volumen und die Kantenlänge des Eiswürfels (s. Gl. 5 und 6):

$$V_{Eis} = \frac{10,8 * 10^{10} \text{ kJ}}{(916,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 333,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 353.265 \text{ m}^3$$

$$l_{Eiswürfel} = \sqrt[3]{353.265 \text{ m}^3} = 70,69 \text{ m}$$

Das Eisvolumen beträgt für das Beispielunternehmen 353.265 m^3 mit einer Kantenlänge von 70,69 m.

Rechenweg für den Privathaushalt

Der Anteil an fossiler Energie berechnet sich aus dem fossilen Anteil des verbrauchten Stroms, dem verbrauchten Gas und dem Benzin- bzw. Dieserverbrauch der Fahrzeuge (s. Gl. 3):

$$Q_{fossil} = 5.000 \text{ kWh} * 78,1 \% + 19.500 \text{ kWh} + 30.000 \text{ kWh} = 53.405 \text{ kWh}$$

Hiernach ergibt sich ein Verbrauch an fossiler Energie in Höhe von 53.405 kWh.

Der Anteil der erneuerbaren Energie ergibt sich aus dem Anteil der Regenerativen Energie am Strommix der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2012 (s. Gl. 4):

$$Q_{regenerativ} = 5.000 \text{ kWh} * 21,9 \% = 1.455 \text{ kWh}$$

Für den Stromverbrauch des Privathaushaltes ergibt sich somit ein Anteil von 1.455 kWh am gesamten Stromverbrauch.

Die Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt, errechnet sich aus nachstehendem Ansatz, wobei hier der Gesamtwirkungsgrad des Haushalts mit 30 % angesetzt wird (s. Gl. 2):

$$Q_{relevant} = (53.405 \text{ kWh} + 1.455 \text{ kWh}) * 3.600 \text{ s} * 0,7 = 1,38 * 10^8 \text{ kJ}$$

Für die relevante Energie ergibt sich ein Wert von $1,38 * 10^8 \text{ kJ}$.

Unter Verwendung der zuvor rechnerisch ermittelten Werte ergeben sich somit das Volumen und die Kantenlänge des Eiswürfels (s. Gl. 5 und 6):

$$V_{Eis} = \frac{1,35 * 10^8 \text{ kJ}}{(916,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 333,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 441 \text{ m}^3$$

$$l_{Eiswürfel} = \sqrt[3]{441 \text{ m}^3} = 7,62 \text{ m}$$

Das Eisvolumen beträgt für den Privathaushalt 441 m^3 mit einer Kantenlänge von 7,62 m.

Ergebnis der Wärmefußabdruckberechnung

Die Beispielrechnungen ergeben für das Kunststoffunternehmen einen Eiskwürfel von 353.265 m^3 und für den Privathaushalt von 441 m^3 . Hieraus resultiert für das Kunststoffunternehmen, durch die in größeren Mengen produzierte Abwärme, eine wesentlich höhere Umweltrelevanz gegenüber dem Privathaushalt. Damit ist das Kunststoffunternehmen um den Faktor 801 umweltrelevanter als der Vierpersonenhaushalt (vgl. Abb. 4). Den größten Anteil am Energieverbrauch des Haushalts haben die beiden PKWs. Dieser beträgt 30.000 kWh/a , was einer jährlichen Laufleistung von 42.900 km bei einem Durchschnittsverbrauch von 7 L/100 km entspricht. Bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 30\%$ [11] werden 70% der eingesetzten Energie als Abwärme ungenutzt abgeführt (siehe Gl. 1). Daraus resultiert für die beiden PKWs ein Eiskwürfel mit einem Volumen von 247 m^3 mit einer spezifischen Kantenlänge von $6,27 \text{ m}$, wodurch die hohe Klimarelevanz von PKWs verdeutlicht wird.

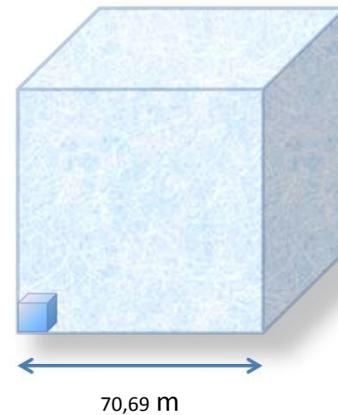


Abbildung 4: Eiswürfelvolumen des Beispielhaushalts (kleiner Würfel) und des Beispielunternehmens (großer Würfel)

Durch diesen Ansatz wird zudem das Verursacherprinzip verdeutlicht. Je größer der Eiskwürfel ausfällt, desto größer ist der Anteil an freigesetzter Abwärme, die ungenutzt in die Atmosphäre gelangt und zusätzlich den Klimawandel beschleunigt. Durch Steigerung der Energieeffizienz und durch sinnvolle Nutzung der anfallenden Abwärme kann der Wärmefußabdruck nachhaltig verändert werden, was sich explizit in einem kleineren Eiskvolumen und einer daraus resultierenden positiveren Umweltrelevanz widerspiegelt.

Anhand der beiden Beispiele sind die Einfachheit des Berechnungsansatzes und die Sinnhaftigkeit der Kennzahl als Bewertungskriterium für die Umweltrelevanz von Energieverbrauchern mehr als deutlich zu erkennen.

Zusammenfassung

Die Konsequenzen aus der Ausbeutung fossiler Energieträger sind heutzutage offensichtlich und haben einen unumkehrbaren und in seiner Geschwindigkeit zunehmenden Klimawandel zur Folge. In Verantwortung für nachfolgende Generationen ist Nachhaltigkeit in Form von hoher Energieeffizienz und minimaler Abwärme zwingend erforderlich. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit ziehen wir den Wärmefußabdruck heran.

Die Berechnung des Wärmefußabdruckes basiert auf einem modellhaften Ansatz, bei dem die jährlich produzierte Abwärme eines Verbrauchers für das Schmelzen eines Eiskwürfels mit einer spezifischen Kantenlänge unter festen Randbedingungen herangezogen wird. Daraus ergibt sich eine Kennzahl, die die Klimarelevanz eines untersuchten Verbrauchers widerspiegelt und durch Steigerung der Energieeffizienz und durch sinnvolle Nutzung der anfallenden Abwärme positiv beeinflusst werden kann.

Die Sinnhaftigkeit des Wärmefußabdrucks zeigt sich beispielhaft an dem Energieverbrauch eines Kunststoffunternehmens im Vergleich zu einem 4 Personen – Privathaushalt. Wärmefußabdrücke sind leicht verständlich und als vergleichbare Kennzahl für Unternehmen, Produkte und Privatpersonen breit anwendbar.

Danksagung

Das Symposium „Nachhaltigkeit fassbar machen- Entropiezunahme als Maß der Nachhaltigkeit“ in der Diplomatischen Akademie in Wien vom April 2012 wurde vom österreichischen Lebensministerium durch Herrn Dr. Jakl initiiert und veranstaltet. Die Diskussionen im Rahmen des Symposiums und viele Folgegespräche mit Herrn Dr. Jakl waren Anregung und Grundlage der vorgelegten Evaluierung von Wärmefußabdrücken. Hierfür danken wir sehr!

Literatur

[1] Bayerisches Landeszentrum (Zugriff am 11.06.2013)

<http://www.blz.bayern.de/blz/web/100065/05ulrich.html>

[2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Zugriff am 11.06.2013)

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energierohstoffbericht,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

[3] Max Planck Institut für Meteorologie (Zugriff am 13.06.2013)

<http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Klimaprojektionen2006.pdf>

[4] Scinexx – Das Wissensmagazin (Zugriff am 13.06.2013)

<http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-9129-2008-11-19.html>

[5] Statistisches Bundesamt (Zugriff am 28.05.2013)

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Bruttostromerzeugung.html>

[6] Energieeinsparungsmaßnahmen – Geht auch mit viel weniger Energie (Zugriff am 15.05.2013)

<http://www.kunststoff-magazin.de/Extrusion/Focus-Extrusion---Energieeinsparungsmaßnahmen.html>

[7] Energiekennzahlen und Energiesparpotenziale in der Kunststoffverarbeitung (Zugriff am 15.05.2013)

http://www.win.steiermark.at/cms/dokumente/11263987_52485981/2709820c/Energiekennzahlen%20und%20Sparpotenziale%20in%20der%20Kunststoffverarbeitung.pdf

[8] Charles E. Mortimer und Ullrich Müller, Thieme-Verlag, Mortimer Chemie, 6. Auflage

[9] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Springer-Verlag, VDI Wärmeatlas, 10. Auflage

[10] Jakl, Sietz, Hrsg. (2012) "Nachhaltigkeit fassbar machen – Entropiezunahme als Maß für Nachhaltigkeit"; Tagungsband zum Symposium am 27. April 2012, Diplomatische Akademie, Wien

[11] Wirkungsgrad Otto-Motor, (Zugriff am 31.07.13)

<http://econtent.fhtw-berlin.de/staticHTML/Courses/Thermodynamik1/section/HyLOs/content/Data/luecke/Therm/Kreis/GeenausgabeKreis/RealeOtto-Diese/RealeOtto-Diese.xhtml>

[12] Jürgen Bennewitz, The World Energy Consumption Dictates the Earth Climate

http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1092127