2 Definition von Wärmefußabdrücken als Instrument messbarer Energieeffizienz und deren Bedeutung in Bezug auf den Klimawandel

Manfred Sietz

2.1 Abstract

Der Wärmefußabdruck ist ein modellhafter Ansatz, bei dem die jährlich produzierte Abwärme für das Schmelzen eines Eiswürfels unter festen Randbedingungen herangezogen wird. Daraus ergibt sich eine Kennzahl, die die Klimarelevanz eines Unternehmens oder eines Produkts widerspiegelt. Über den Wärmefußabdruck lässt sich die Nachhaltigkeitsleistung messbar und visuell im Eiswürfelmodell darstellen.

2.2 Einleitung

Der Klimawandel ist vereinfacht zusammengefasst die Folge aus einem stetig wachsenden Abwärmeeintrag in das System Erdatmosphäre/Erdoberfläche in immer kürzeren Zeitabständen und einem immer größer werdenden Zeitraum für das Zurückhalten von Wärme durch klimarelevante Gase, wie z. B. stetig zunehmendes CO_2. Diese beiden Einträge beschleunigen die Entropiezunahme im physikalischen System Erdatmosphäre/Erdoberfläche und damit den Klimawandel. Energieeffizienz ist das Stichwort unserer Zeit. Das Ziel ist, bei möglichst hohem Wirkungsgrad und möglichst geringen Verlusten, eine vorhandene Energie vollständig in Arbeit zu verwandeln. Der Teil der Energie, der sich z. B. wegen Reibungs- und anderen Verlusten nicht in Arbeit umwandeln lässt, wird durch den Begriff der Entropie beschrieben. Um die Entropie eines Systems zu erhöhen, wird bei gegebener Temperatur auf das System oder seine Umgebung („Umwelt“) Wärme transferiert. Abwärme, die ungenutzt in die Atmosphäre entwichen ist, lässt sich nicht mehr in sinnvolle Arbeit umwandeln. Diese Abwärme ist verlorene Energie, „Entropie“. Es gilt also, den Klimawandel u. a. durch Energieeffizienz zu verlangsamen, den

M. Sietz (✉)
Hochschule Ostwestfahlen-Lippe
Höxter, Deutschland
E-Mail: manfred.sietz@hs-owl.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

M. Sietz (Hrsg.), *Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz*,
DOI 10.1007/978-3-662-49935-1_2

Klimawandel nachhaltig zu gestalten. Eine Glühbirne, die nur 5 % der elektrischen Energie in Licht verwandelt und 95 % in Abwärme, können wir uns aus der Sicht des Klimaschutzes nicht leisten.

Die Minimierung von Abwärme und unnützer CO_2 Emissionen sind für Unternehmen eine große Herausforderung. Hohe Wärmenutzung und geringe CO_2 Emissionen sind typische Leistungsindikatoren für alle Unternehmen.

Erfolgreiches Klimaschutzmanagement in Unternehmen setzt neben der Pflege und der Weiterentwicklung von betrieblichen Nachhaltigkeitsindikatoren auch klare sowie personifizierte Ziele (Visionen) und Verantwortlichkeiten voraus.

Auch die Mitarbeiter/innen müssen sich in den Fragen der Nachhaltigkeit und des Klimawandels qualifizieren; wer heute seinen Arbeitsplatz nachhaltig sichern will, muss es verstehen, durch seine Tätigkeit dem Unternehmen nachhaltig zu nutzen. So werden Nachhaltigkeit und Klimaschutz Teil der Qualitätsoffensive der Unternehmen. Ressourcenschonung, Erhöhung der Wirkungsgrade, Abwärmenutzung und der Wille nach kontinuierlicher Verbesserung der Nachhaltigkeitsleistung des Unternehmens, dies alles ist Teil derjenigen Qualität, die der Kunde unterbewusst mit einem Produkt mit kauft.

Zukunftsorientierte Zielvorgaben und Leitbilder sind Teil der nachhaltigen Unternehmensplanung. Der obersten Managementebene des Unternehmens muss es gelingen, die Nachhaltigkeitsvisionen und Ziele zu personalisieren, Zeit und Mittel bereitzustellen sowie Erfolgskontrollmechanismen einzuziehen. Das mittlere sowie das untere Management müssen Nachhaltigkeit begrifflich als solche verstehen und als Chance für den Erhalt der Unternehmenszukunft und ihrer Arbeitsplätze auffassen. Zukunftsfähigkeit von Produkten und Unternehmen fällt nicht einfach vom Himmel, sie muss kontinuierlich gewollt und geplant werden.

In der Verantwortung für kommende Generationen und gegenüber der Natur ist ein Umdenken zwingend erforderlich. Das Stichwort dazu lautet „Nachhaltigkeit". Nachhaltig ist alles, was den Klimawandel verlangsamt und uns besser auf die (sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen) Folgen vorbereitet.

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

Auf dem Weg zur Verlangsamung des Klimawandels sind Abfallvermeidung, Abwärmeminimierung, Ressourcenschonung, CO_2- und Energieeinsparungen erste Schritte, um den Klimawandel nachhaltig zu gestalten! Hierzu bedarf es einheitlicher Managementtools, die den Nachhaltigkeitsbegriff messbar und normierbar machen.

Fußabdrücke als Unternehmenskennzahl zur Beschreibung dessen Umweltleistung sind etablierte Managementtools:

Ein CO_2-Fußabdruck repräsentiert die Fläche Wald, die pro Jahr benötigt wird, um eine emittierte Menge CO_2 zu binden. Im Vergleich dazu ist ein Wärmefußabdruck die Grundfläche eines Eiswürfels einer bestimmten Kantenlänge, der durch die freigesetzte Abwärme in einem Jahr irreversibel schmilzt.

Der Wärmefußabdruck basiert auf der jährlichen Wärmemenge, die ungenutzt in die Erdatmosphäre gelangt und hierbei die Strahlungs- und Wärmebilanz des Systems Erdoberfläche/Atmosphäre „nachhaltig“, und zwar negativ beeinflusst.

Die Berechnung des Wärmefußabdrucks 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. 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).

Je größer der Wärmefußabdruck und die daraus folgende Temperaturerhöhung in der Atmosphäre ist, desto größer ist das irreversibel geschmolzene Eisvolumen.

Was macht den Eiswürfelansatz so attraktiv? Im Wesentlichen sind dies zwei Dinge:

- Die Nachhaltigkeit von Produkten, Anlagen bzw. Unternehmen lässt sich leicht verständlich visualisieren.
- Der Zusammenhang zwischen Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Klimawandel ist im öffentlichen Bewusstsein angekommen.

Alle unsere Aktivitäten, als Privatleute genauso wie als Unternehmen, korrelieren mit einem Energieverbrauch und einem vorgegebenen (in der Regel schlechten Wirkungsgrad). Dadurch wird Abwärme/Entropie freigesetzt, und jede Freisetzung von Abwärme/Entropie bedeutet eine Entropieerhöhung des physikalischen Systems Erde. Die Entropiezunahme ist irreversibel; das bedeutet, Energie die einmal ungenutzt in Wärme umgewandelt wurde und in der Atmosphäre angekommen ist, kann energieneutral nicht wieder zur Arbeitsleistung herangezogen werden.

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

Betrachten wir ein Beispiel, wobei auf die Rechenformeln im nachfolgenden Text ausführlicher eingegangen wird. Vorab die Ergebnisse: Ein Auto hat einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von nur ca. 30–35 %. Das heißt, von 1 L „Kraftstoff“ gehen 300–350 mL in die Fortbewegung des Autos und 650–700 mL als Abwärme direkt in die Atmosphäre. Was bedeutet das aus „Eiswürfelsicht“?

Ein durchschnittlicher Mittelklassewagen fährt nur ca. 200 m (!), um einen $10 \times 10 \times 10$ cm großen Eiswürfel durch die frei werdende Abwärme irreversibel zu schmelzen. Oder: Ein typischer Mittelklasse-Benziner hat einen Nutzungsgrad von ca. 30 %, einen geschätzten durchschnittlichen Verbrauch von ca. 7 L/100 km und eine angenommene jährliche Fahrleistung von ca. 21.450 km. Unter diesen Voraussetzungen bringt das Fahrzeug pro Jahr einen Eiswürfel mit einem Volumen von 113 m^3 zum Schmelzen!

Angesichts dieser überraschenden Zahlenwerte und der aktuellen Prognosen des Club of Rome für das Jahr 2052 müssen wir uns fragen, ob wir uns das Ausbeuten aller theoretisch verfügbaren fossilen Quellen auch klimatisch leisten und ob wir diese Klimabelastung durch mehr Ressourcen- und Energieeffizienz im wirtschaftlichen und privaten Bereich zumindest werden kompensieren können.

Nachhaltig ist alles, was die Ressourcen- und Energieeffizienz erhöht und so den Klimawandel verlangsamt.

Ein Prozess mit einem hohen Wirkungsgrad produziert wenig Abwärme/Entropiezunahme auf der Oberfläche des physikalischen Systems Erde.

Durch den Wärmefußabdruck kann die Klimaschutzleistung eines Unternehmens als spezifische Kennzahl anschaulich dargestellt werden, wie der nachfolgende Berechnungsansatz zeigt.

2.3 Berechnungsansatz des Wärmefußabdrucks

Die Berechnung des Wärmefußabdrucks basiert auf einem modellhaften Ansatz, bei dem die jährlich produzierte Abwärme für das Schmelzen eines Eiswürfels mit einer spezifischen Kantenlänge unter festen Randbedingungen herangezogen wird.

Das Produkt der verbrauchten Energiemenge und dem spezifischen Gesamtwirkungsgrad des Verbrauchers ergibt die relevante (Wärme-)Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt (Gl. 2.1). Diese relevante Energie setzt sich aus fossiler Energie und erneuerbarer Energie zusammen und ist damit die Summe aus beiden. Dabei wird der Anteil an erneuerbarer Energie am Strommix in Deutschland berücksichtigt.

Der Anteil an fossiler Energie berechnet sich aus dem Energieverbrauch an Strom, multipliziert mit x % fossilem Anteil am jeweils aktuellen Strommix und am sonstigen fossilen Energieverbrauch, wie z. B. für Heizzwecke, für den Fuhrpark und die An- und Abfahrt der Mitarbeiter (Gl. 2.2). 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 25,8 % erneuerbarem Anteil am 2014er Strommix (Gl. 2.2), geht jedoch nur zu 3 % in die Rechnung ein (Gl. 2.1). Dieser prozentuale Anteil ergibt sich aus der Tatsache, dass beispielsweise für die Produktion und Errichtung von Windkraftanlagen Emissionen freigesetzt werden und diese demnach geringfügig klimarelevant sind:

$$Q_{relevant} = (Q_{fossil} + Q_{regenerativ} \times 3\,\%) \times 3600\,s \times \eta_{spezifisch}, \tag{2.1}$$

$$Q_{fossil} = Q_{gesamt} \times 74{,}2\,\% + Q_{sonstiges}, \tag{2.2}$$

$$Q_{regenerativ} = Q_{gesamt} \times 25{,}8\,\%, \tag{2.3}$$

$Q_{relevant}$ = 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 H 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 °C (Gl. 2.4). Aus dem ermittelten Volumen V errechnet sich über die dritte Wurzel die Kantenlänge l des Würfels (Gl. 2.5):

$$V_{Eis} = \frac{Q_{relevant}}{\rho_{Eis} \times H}, \tag{2.4}$$

$$l_{Eiswürfel} = \sqrt[3]{V_{Eis}}, \tag{2.5}$$

$Q_{relevant}$ = relevante Energie zum Schmelzen des Eiswürfels [kJ]
ρ_{Eis} = Eisdichte bei 0 °C mit 0,918 g/m³
H = Schmelzenthalpie des Eises mit 334,4 kJ/kg
V_{Eis} = Volumen des Eiswürfels [m³]
$l_{Eiswürfel}$ = Kantenlänge des Eiswürfels [m]

2.4 Beispiele zur Berechnung des Wärmefußabdrucks – Kunststoffunternehmen versus Vierpersonenhaushalt

Zur Verdeutlichung des Rechenweges bei der Ermittlung des Wärmefußabdrucks wird dieser exemplarisch am Beispiel eines Unternehmens der Kunststoffbranche sowie eines Vierpersonenhaushalts mit zwei PKWs durchgeführt. Die Basisinformationen für das betrachtete Unternehmen und den betrachteten Haushalt für die Verbräuche (im Jahr 2012) können nachfolgender Aufstellung entnommen werden.

Basisinformationen für die Rechenbeispiele		
	Unternehmen	Privathaushalt
Mitarbeiteranzahl/Bewohner	367	4
Strom	30.159.169 kWh	5000 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 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 vorgegeben. 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 Privathaushalts wird vereinfacht zu 30 % angenommen. Der spezifische Wirkungsgrad des Unternehmens wurde durch Aufstellung exemplarischer, unternehmensbezogener Energiebilanzen zu ca. 20 % gemessen bzw. abgeschätzt.

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. Unter der Berücksichtigung, dass im restlichen Betrieb weitere Abwärme anfällt, ergibt sich für den gesamten Betrieb ein abgeschätzter Abwärmeanteil von 80 % des Gesamtenergieverbrauchs.

2.4.1 Rechenweg für das Kunststoffunternehmen (Bezugsjahr 2012)

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. Dieselverbrauch der Mitarbeiter für die An- und Abfahrt zur Arbeitsstelle:

$$\begin{aligned} Q_{\text{fossil}} &= 30.159.169\,\text{kWh} \times 77{,}2\,\% + 4.567.754\,\text{kWh} + 550.567\,\text{kWh} \\ &\quad + 220.155\,\text{kWh} \\ &= 28.621.354\,\text{kWh}. \end{aligned}$$

Hiernach ergibt sich ein Verbrauch an fossiler Energie in Höhe von 28.621.354 kWh. Der Anteil der erneuerbaren Energie ergibt sich aus dem Anteil der regenerativen Energie am Strommix der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2012 gemäß https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Bruttostromerzeugung.html (Zugriff 15.7.2015):

$$Q_{\text{regenerativ}} = 30.159.169\,\text{kWh} \times 22{,}8\,\% = 6.876.290\,\text{kWh}.$$

Die Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt, errechnet sich aus nachstehendem Ansatz, wobei hier die regenerative Energie aus oben genanntem Grund nur zu 3 % eingeht und der Gesamtwirkungsgrad des Unternehmens mit 20 % angesetzt wird:

$$\begin{aligned} Q_{\text{relevant}} &= (28.621.354\,\text{kWh} + 6.876.290\,\text{kWh} \times 3\,\%) \times 3600\,\text{s} \times 0{,}8 \\ &= 8{,}3 \times 10^{10}\,\text{kJ}. \end{aligned}$$

Unter Verwendung der zuvor rechnerisch ermittelten Werte ergeben sich somit das Volumen und die Kantenlänge des Eiswürfels (Gl. 2.5):

$$\begin{aligned} V_{Eis} &= \frac{8{,}3 \times 10^{10}\,\text{kJ}}{918\,\text{kg/m}^3 \times 334{,}4\,\text{kJ/kg}} = 270.376\,\text{m}^3, \\ l_{Eiswürfel} &= \sqrt[3]{270.376\,\text{m}^3} = 64{,}66\,\text{m}. \end{aligned}$$

Das im Jahr 2012 irreversibel geschmolzene Eisvolumen für das Beispielkunststoffunternehmen beträgt 270.376 m^3 mit einer Kantenlänge von 64,66 m.

2.4.2 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. Dieselverbrauch der beiden angenommenen Fahrzeuge:

$$Q_{fossil} = 5000\,\text{kWh} \times 77{,}2\,\% + 19.500\,\text{kWh} + 30.000\,\text{kWh} = 53.360\,\text{kWh}.$$

Der Anteil der erneuerbaren Energie ergibt sich aus dem Anteil der regenerativen Energie am Strommix der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2012 mit 22,8 % zu:

$$Q_{regenerativ} = 5000\,\text{kWh} \times 22{,}8\,\% = 1140\,\text{kWh}.$$

Die Energie, die zum Schmelzen des Eiswürfels führt, errechnet sich aus nachstehendem Ansatz, wobei hier die regenerative Energie aus oben genanntem Grund nur zu 3 % eingeht und der Gesamtwirkungsgrad des Privathaushalts zu 30 % geschätzt wird:

$$Q_{relevant} = (53.360\,\text{kWh} + 1140\,\text{kWh} \times 3\,\%) \times 3600\,\text{s} \times 0{,}7 = 1{,}35 \times 10^8\,\text{kJ}.$$

Unter Verwendung der zuvor rechnerisch ermittelten Werte ergeben sich somit das Volumen und die Kantenlänge des Eiswürfels:

$$\begin{aligned} V_{Eis} &= \frac{1{,}35 \times 10^8\,\text{kJ}}{918\,\text{kg/m}^3 \times 334{,}4\,\text{kJ/kg}} = 440\text{m}^3, \\ l_{Eiswürfel} &= \sqrt[3]{440\,\text{m}^3} = 7{,}61\,\text{m}. \end{aligned}$$

Das im Jahr 2012 irreversibel geschmolzene Eisvolumen für den Privathaushalt beträgt 440 m^3 mit einer Kantenlänge von 7,61 m.

2.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Wie lassen sich diese beiden Ergebnisse vergleichend interpretieren? Die Beispielrechnungen ergeben für das Kunststoffunternehmen einen Eiswürfel von

270.376 m^3 und für den Privathaushalt von 440 m^3. Hieraus resultiert für das Kunststoffunternehmen eine wesentlich höhere Klimarelevanz gegenüber dem Privathaushalt, was im Prinzip nicht überrascht. Das Kunststoffunternehmen ist um den Faktor 615 klimarelevanter als der Vierpersonenhaushalt.

Den größten Anteil am Energieverbrauch des Haushalts haben die beiden PKWs. Dieser beträgt 30.000 kWh/Jahr, was einer jährlichen Laufleistung von 42.900 km bei einem Durchschnittsverbrauch von 7 L/100 km entspricht. Bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 30\,\%$ werden 70 % der eingesetzten Energie als Abwärme ungenutzt abgeführt. Daraus resultiert für die beiden PKWs ein Eiswürfel mit einem Volumen von 226 m^3 mit einer spezifischen Kantenlänge von 6,1 m, wodurch die hohe Klimarelevanz von PKWs verdeutlicht wird.

2.5 Wärmefußabdrücke am Beispiel einer Brauerei

2.5.1 Berechnungsansatz

Bei der Berechnung der Wärmefußabdrücke wird der Energiebedarf der Brauerei aus den Jahren 2011 und 2012 miteinander verglichen. Es wird eine virtuelle Systemgrenze „von Werktor zu Werktor“ in Ansatz gebracht, sodass lediglich die Nutzung der Anlagen und Maschinen, der Brauvorgang, die Lagerung auf dem Werksgelände und die Abfüllung eingerechnet werden.

Der Einsatz erneuerbarer Energien am Strommix in Deutschland ist in den jeweiligen Berechnungen berücksichtigt, hat aber keinen Einfluss auf den Wärmefußabdruck der Gebäude, da es für die Energieeffizienz irrelevant ist, ob die Energie konventionell oder regenerierbar erzeugt wurde. Einzig die Erhöhung der Energieeffizienz durch z. B. modernisierte Anlagentechnik oder andere Energiesparmaßnahmen haben einen positiven Einfluss auf den Wärmefußabdruck. Der Energieverbrauch der Brauerei betrug

- 2011: 5.259.565 kWh,
- 2012: 5.063.849 kWh.

2.5.2 Berechnung des Eiswürfels für das Jahr 2011

$$
\begin{aligned}
Q_{relevant} &= (5.259.565\,\text{kWh}) \times 3600\,\text{s} \times 0{,}8 = 1{,}51 \times 10^{10}\,\text{kJ} \\
V_{Eis} &= 1{,}51 \times 10^{10}\,\text{kJ}/(916{,}7\,\text{kg/m}^3 \times 333{,}5\,\text{kJ/kg}) = 49.547\,\text{m}^3 \\
l_{Eiswürfel} &= \sqrt[3]{49.547\,\text{m}^3} = 36{,}72\,\text{m}
\end{aligned}
$$

Das Volumen des Eiswürfels, der durch die Brauerei im Jahr 2011 schmilzt, beträgt 49.547 m^3.

2.5.3 Berechnung des Eiswürfels für das Jahr 2012

$$
\begin{aligned}
Q_{\text{relevant}} &= (5.063.849\,\text{kWh}) \times 3600\,\text{s} \times 0{,}8 = 1{,}46 \times 10^{10}\,\text{kJ} \\
V_{\text{Eis}} &= 1{,}46 \times 10^{10}\,\text{kJ}/(916{,}7\,\text{kg/m}^3 \times 333{,}5\,\text{kJ/kg}) = 47.703\,\text{m}^3 \\
l_{\text{Eiswürfel}} &= \sqrt[3]{47.703\,\text{m}^3} = 36{,}26\,\text{m}
\end{aligned}
$$

Das Volumen des Eiswürfels, der durch die Brauerei im Jahr 2012 schmilzt, beträgt $47.703\,\text{m}^3$.

2.5.4 Vergleich der Wärmefußabdrücke 2011 und 2012

Beim Vergleich der Wärmefußabdrücke der Brauerei mit den Energiedaten aus den Jahren 2011 und 2012 fällt auf, dass sich das jährlich geschmolzene Eisvolumen im Jahr 2012 im Vergleich zum Jahr 2011 um $1844\,\text{m}^3$ verringert hat. In anderen Worten: Es sind $1844\,\text{m}^3$ Eis weniger geschmolzen! Dies ist eine unternehmensbezogene messbare Klimaschutzleistung.

Die einmalige Reduktion eines Wärmefußabdrucks ist jedoch nur wenig aussagekräftig, denn sie muss nicht durch Energieeffizienzmaßnahmen aktiv herbeigeführt worden sein und kann z. B. auch durch eine Verringerung der Produktionsmenge resultieren.

Interessanter sind daher eine mehrjährige Erstellung und Auswertung eines Wärmefußabdrucks. Hierzu betrachten wir das folgende Beispiel aus der metallverarbeitenden Industrie.

2.6 Wärmefußabdrücke Beispielbetrieb der metallverarbeitenden Industrie

Die nachfolgende Aufstellung zeigt die jährlichen Eiswürfelvolumina im Zeitraum von 2003 bis 2012:

Jahr	Volumen Eiswürfel im m^3	Kantenlänge in m
2003	260.068	63,8
2004	243.735	62,5
2005	234.361	61,7
2006	215.155	59,9
2007	210.233	59,5
2008	216.922	60,1
2009	227.614	61,1
2010	238.130	62,0
2011	232.041	61,5
2012	232.206	61,5

Wenn die jährliche Verringerung des geschmolzenen Eiswürfels in Bezug auf das Jahr 2003 in erster Näherung berechnet wird, kann dies als positiver Klima-

schutzbeitrag des Unternehmens in Form eines nicht geschmolzenen Summeneiswürfels sehr gut visualisiert werden: Der nicht geschmolzene Eiswürfel ist mit ca. 290.000 m^3 größer als der in 2012 geschmolzene Eiswürfel von ca. 230.000 m^3! Die Klimaschutzleistung eines Unternehmens wird als Folge kontinuierlich umgesetzter Energieeinsparungen über die Darstellung des sozusagen „eingesparten" Eiswürfels als Klimaschutz*leistung* leicht verständlich. Es zeigt sich auch, dass der Einsparungseffekt durch die dritte Wurzel anhand der Kantenlängen weniger deutlich wird als bei dem Volumen.

Lässt sich das Eiswürfelmodell mit seinen Wärmefußabdrücken auch produktbezogen anwenden? Hierzu wird der Wärmefußabdruck eines KfW-Effizienzhauses 40 mit dem eines konventionellen Hauses (Baujahr 1979–1983) verglichen.

2.7 Wärmefußabdruck eines KfW-Effizienzhauses 40 im Vergleich zu einem Altbau aus den 1980er Jahren

Zur Bewertung der Ergebnisse dieser Berechnung werden ein Wärmefußabdruck eines Altbaus im Bestand und ein Wärmefußabdruck eines KfW-Effizienzhauses 40 erstellt. Es wird von den gleichen Grundeigenschaften der Gebäude ausgegangen. Die Daten zum KfW-Effizienzhaus 40 und Altbau aus den 1980er Jahren für den Altbau zeigen einen jährlich geschmolzenen Eiswürfel mit 5,27 m Kantenlänge und für das KfW-Effizienzhauses 40 einen deutlich kleineren Eiswürfel von nur noch 3,07 m Kantenlänge.

Es wird hierbei eine virtuelle Systemgrenze „von Gartenzaun zu Gartenzaun" in Ansatz gebracht, sodass lediglich die Nutzung und das Leben in den jeweiligen Räumen eingerechnet werden. Die Bauphase, Transporte der Energieträger (Pellets, Heizöl, Holzscheite usw.) und die Nutzung der Gebäude am Ende ihres Lebenszyklus werden nicht mit berücksichtigt.

Es zeigt sich erneut, dass die Eiswürfelvolumina beeindruckender sind als die Kantenlängen der jeweiligen Eiswürfel: Das Eisvolumen, das ein unsanierter Altbau (Baujahr 1979–1983) durch die freigesetzte Abwärme jährlich zum Schmelzen bringt, beträgt 141,53 m^3. Das KfW-Effizienzhaus 40 produziert im Vergleich die geringste Abwärme. Das Eisvolumen, das durch die freigesetzte Abwärme jährlich zum Schmelzen gebracht wird, beträgt nur 28,01 m^3.

Aus den in Wärmefußabdrücken abgebildeten Daten für den Heizwärmebedarf lassen sich die jährlichen Energiekosten errechnen. Hier gilt als Faustformel: Je kleiner der Wärmefußabdruck (Eiswürfel) ist, desto geringer fallen der Heizwärmebedarf und damit die Heizkosten aus.

Durch die unterschiedlichen Gebäudetypen, was Konstruktion und Anlagentechnik betrifft, ist der Energiebedarf der Gebäude unterschiedlich. Um 1 m^2 zu heizen, werden beispielsweise im KfW-Effizienzhaus 40 lediglich 29,5 kWh verbraucht, während dafür im Altbau 149 kWh nötig sind. Aus dieser Differenz resultieren die Vorteile des KfW-Effizienzhauses 40, die sich auch in den Heizkosten deutlich niederschlagen.

2.8 Zusammenhang Wärmefußabdrücke und Nachhaltigkeit

Wie stellt man mithilfe von Eiswürfeln dar, dass nachhaltiger Getränkekonsum auf dem Verzehr regionaler Produkte/Getränke basiert? Wir gehen von einem Modell aus, wonach ein typischer Konsument aus Holzminden die Wahl hat, diverse Mineralwässer verschiedener bundesweiter Anbieter zur sommerlichen Erfrischung zu trinken. Darunter sind eine regionale Quelle und im Vergleich dazu ein bekanntes Mineralwasser aus der Provinz Bergamo/Italien. Der Quellort liegt ca. 937 km von Holzminden entfernt.

2.8.1 Berechnung des Verbrauchs Dieselkraftstoff der o. g. Mineralwässer, um 1 L Mineralwasser auf den Marktplatz in Holzminden zu bringen

Wir gehen hierzu von Folgendem aus: Die Mineralwässer werden in Flaschen mit einem 25-t-LKW bei 31 L/100 km Dieselverbrauch nach Holzminden gebracht, und derselbe LKW fährt mit Leergut (Gesamtgewicht 16 t; Verbrauch 28 L Diesel/100 km) zurück. Die Fracht beträgt 10 t Mineralwasser, Bezug reines Mineralwasser ohne Flaschengewicht.

Das Mineralwasser aus der Provinz Bergamo hat eine Transportentfernung nach Holzminden von 937 km. Nach http://www.forum-speditionen.de/kraftstoff-verbrauch-und-gesamtgewicht-5868 (Zugriff 17.7.2015) führt diese Transportentfernung zu einem Dieselverbrauch von 290,5 L hin und 262,4 L zurück. In der Summe also 552,91 für 10 t Fracht. Daraus resultieren 0,0553 L Dieselverbrauch/1 L Mineralwasser aus Bergamo.

Das regionale Mineralwasser hat eine Transportentfernung zum Marktplatz Holzminden von etwa 10 km. Der Dieselverbrauch für die Hin- und Rückfahrt beträgt 5,9 L; dies entspricht 0,0006 L Dieselverbrauch/1 L Mineralwasser.

Der durchschnittliche Mineralwasserkonsum in Deutschland belief sich im Jahr 2014 auf 143,5 L (1 L = 1 kg) (http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2809/umfrage/pro-kopf-verbrauch-von-mineral-und-heilwasser/, Zugriff 17.7.2015).

Die Einwohnerzahl in Holzminden beträgt ca. 20.000 EW, d. h., es werden dort durchschnittlich 2.870.000 L Mineralwasser pro Jahr getrunken. 1 L Diesel wird zu etwa 2,62 kg CO_2 (http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftstoffverbrauch, Zugriff 17.7.2015).

2.8.2 Berechnung der CO_2 Emissionen aus dem Mineralwassertransport der beiden o. g. Anbieter, unter der Annahme, dass beide Mineralbrunnenbetriebe den jährlichen durchschnittlichen Mineralwasserverbrauch der Holzmindener Bürger zum Marktplatz in Holzminden anliefern

Die aus der Anlieferung aus der Provinz Bergamo resultierende klimaschädliche CO_2-Menge lässt sich wie folgt berechnen:

$$0{,}0553\,\text{L Diesel}/1\,\text{L Mineralwasser} \times 143{,}5\,\text{L Mineralwasserverbrauch} \times 20.000\,\text{EW} = \text{jährlicher Dieselverbrauch } 158.711\,\text{L} = 415.822{,}8\,\text{kg } CO_2.$$

Für den Transport des regionalen Mineralwassers ergibt sich:

$$0{,}0006\,\text{L Diesel}/1\,\text{L Mineralwasser} \times 143{,}5\,\text{L Mineralwasserverbrauch} \times 20.000\,\text{EW} = \text{jährlicher Dieselverbrauch } 1722\,\text{L} = 4511{,}6\,\text{kg } CO_2.$$

Da man sich 1 kg CO_2 schlecht vorstellen kann, wird der jährliche Dieselverbrauch aus dem o. g. Mineralwasserkonsum als produktbezogener Wärmefußabdruck in Form von Eiswürfeln dargestellt: 1 L Diesel entsprechen 9,25 kWh, also ca. 10 kWh (http://www.dwv-info.de/wissen/tabellen/wiss_enr.html, Zugriff 17.7.2015).

2.8.3 Berechnung des Wärmefußabdrucks als geschmolzener Eiswürfel durch die beim Mineralwassertransport freigesetzte Wärmemenge der beiden o. g. Mineralbrunnenbetriebe unter der Annahme, dass die beiden Mineralbrunnenbetriebe den jährlichen durchschnittlichen Mineralwasserkonsum der Holzmindener Bürger zum Marktplatz in Holzminden anliefern (Umrechnung 1 kWh = 3600 kJ)

Mineralbrunnen Provinz Bergamo	158.711 kWh	= 571.359.600 kJ	= 1861 m^3 Eiswürfel
Regionaler Mineralbrunnen	1722 kWh	= 6.199.200 kJ	= 20 m^3 Eiswürfel

Unter der Annahme, dass beide Mineralbrunnenbetriebe den jährlichen durchschnittlichen Mineralwasserkonsum der Holzmindener Bürger komplett durch Anlieferung zum Marktplatz in Holzminden abdecken, ergibt sich zusammenfassend: Würden die Holzmindener ihr Mineralwasser nachhaltig aus einer regionalen Mineralquelle trinken, so würde ein gigantischer Eisberg pro Jahr weniger (unumkehrbar!) schmelzen.

http://www.springer.com/978-3-662-49934-4

Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz
Nachhaltigkeit messbar machen
Sietz, M. (Hrsg.)
2016, VIII, 212 S. 370 Abb., Softcover
ISBN: 978-3-662-49934-4