Manfred Sietz *Hrsg.*

Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz

Nachhaltigkeit messbar machen

Springer Spektrum

Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz

Manfred Sietz
Herausgeber

Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz

Nachhaltigkeit messbar machen

Springer Spektrum

Herausgeber
Manfred Sietz
Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Höxter, Deutschland

ISBN 978-3-662-49934-4 ISBN 978-3-662-49935-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-49935-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort

Stellen Sie sich vor, alle reden von Nachhaltigkeit, und keiner macht etwas.

Stellen Sie sich vor, keiner redet von Entropiezunahme, und alle wollen wie immer weitermachen.

Stellen Sie sich vor, die Beschleunigung des Klimawandels und die einmalig geschmolzenen Eisberge sind allgemeines Gesprächsthema, und alle machen bei der Verlangsamung der Entropiezunahme mit. Und alle gehen einen wichtigen Schritt in die Richtung, Nachhaltigkeit messbar zu machen.

Stellen Sie sich vor, alle reden von in messbaren Eiswürfeln ausdrückbarer Nachhaltigkeit, und alle machen praktisch mit. Schön, nicht wahr?

Und deshalb laden wir Sie in unserem Buch nicht nur zur Beschäftigung mit der entropiebasierten, messbaren Nachhaltigkeit ein, sondern wir gehen mit Ihnen in die Unternehmenspraxis der Energieeinsparung und Ressourcenschonung.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Frau Regine Zimmerschied für das Copy Editing bedanken und bei Frau Anja Groth und Frau Merlet Behncke-Braunbeck vom Springer Verlag für die geduldige und einfühlsame Verlagsbetreuung.

Inhaltsverzeichnis

1 Entropie – ein Indikator für Nachhaltigkeit 1
Thomas Jakl
1.1 Zusammenfassung 1
1.2 Einleitung 1
1.3 Der Mensch rückt ins Zentrum der Umweltpolitik 2
1.4 Entropie als Indikator für „Qualität“ 3
1.5 Die Entropie aus verschiedenen Blickwinkeln – Konsequenzen für ihre Rolle in der Umweltdiskussion 4
1.6 Entropiebetrachtung stößt ein Fenster auf mit Blick auf den Wesenskern der Nachhaltigkeitsfrage 5
1.7 Ein neues Paradigma für die Wirtschaft 6
1.8 Schlussbetrachtung 8

2 Definition von Wärmefußabdrücken als Instrument messbarer Energieeffizienz und deren Bedeutung in Bezug auf den Klimawandel 9
Manfred Sietz
2.1 Abstract 9
2.2 Einleitung 9
2.3 Berechnungsansatz des Wärmefußabdrucks 12
2.4 Beispiele zur Berechnung des Wärmefußabdrucks – Kunststoffunternehmen versus Vierpersonenhaushalt 13
2.5 Wärmefußabdrücke am Beispiel einer Brauerei 16
2.6 Wärmefußabdrücke Beispielbetrieb der metallverarbeitenden Industrie 17
2.7 Wärmefußabdruck eines KfW-Effizienzhauses 40 im Vergleich zu einem Altbau aus den 1980er Jahren 18
2.8 Zusammenhang Wärmefußabdrücke und Nachhaltigkeit 19
2.9 Zusammenfassung 21

3 Praxisbeispiel: Einrichtung und Aufrechterhaltung eines Energiemanagementsystems nach ISO 50001 bei der Wentus Kunststoff GmbH, Höxter 23
Olaf Buick, Reinhard Preuß, Jörg Söhngen und Manfred Sietz
3.1 Vorwort zum Praxisbeispiel Wentus Kunststoff GmbH, Höxter . . 23
3.2 Kurze Unternehmensbeschreibung 24
3.3 Energiesituation und Vorarbeiten zur Erstzertifizierung in 2012 – Auszug aus dem Originalbericht in der Mitarbeiterzeitung 25
3.4 Die erfolgreiche Rezertifizierung in 2015 – Originalbericht aus der Mitarbeiterzeitung: „Energiemanagementsystem nach DIN ISO 50001“ 26

4 Praxisbeispiel Goeken Backen GmbH, Bad Driburg 139
Jens Ahle, Matthias Goeken, Andreas Wiesner, Jürgen Pöppel und Rene Schmelter
4.1 Einleitung 139
4.2 Projektziel 140
4.3 Projektschritte Erfassung Filialstruktur 141
4.4 Projektschritte Erfassung Zentrale 154
4.5 Zusammenführung der Daten 156
4.6 Vorbereitung der Zertifizierung 157
4.7 Resümee 167

5 Nachhaltigkeitsbewertung der Klimaschutzleistung von Produkten – Checkliste 169
Manfred Sietz

6 Die ISO 50001 als potenzieller Rahmen für messbare Nachhaltigkeit 199
Manfred Sietz

7 Entropic Score Print 201
Manfred Sietz

8 Zusammenfassender Ausblick 203
Manfred Sietz

Autorenverzeichnis 205

Literatur 209

Sachverzeichnis 211

Entropie – ein Indikator für Nachhaltigkeit

1

Thomas Jakl

1.1 Zusammenfassung

Im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte drohte der klassische Umweltschutz von einem Wertekanon der Beliebigkeit vereinnahmt zu werden – eine Tendenz, die sich durch die aktuelle Konzentration auf Resilienz noch zu verstärken droht. Die Berücksichtigung der Entropie bei der Bewertung von Produkten, Verfahren und Politiken würde zum Wesenskern des Umweltschutzes und damit zu den eigentlichen zentralen Herausforderungen zurückführen: Regenerierbarkeit von Ressourcen, optimierte Strukturerhaltung in Wirtschaftsprozessen und empathische Wertebildung in der Gesellschaft.

1.2 Einleitung

Es ist der gesellschaftliche Interessensausgleich, der während einer politischen Diskussion dafür Sorge trägt, dass Maßnahmen ausgewogen gestaltet werden und nicht zu einseitigen Belastungen führen. Das eigentliche Ziel dieser Maßnahmen darf dabei jedoch nicht aus dem Blick geraten und muss von den Institutionen, bei denen die Kernkompetenz liegt, eingemahnt werden. Dies gilt grundsätzlich für alle Politikbereiche, so auch für den Umweltschutz. Gerade dieser jedoch geriet in besonderem Ausmaß unter Druck. Das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung, dem ja der Ausgleich zwischen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Interessen innewohnt, habe Umweltschutzmaßnahmen schon in der Phase der Konzeption zu prägen – so eine gängige Forderung, vor allem aus Wirtschaftskreisen. Der nachfolgende ausgleichende Dialog findet dann aber natürlich trotzdem statt, mit der Gefahr, dass Interessensgruppen den – ohnehin schon ausgeglichen gestalteten Maßnahmenentwurf – weiter zu ihren Gunsten verändern (vgl. Ruth 2007;

T. Jakl (✉)
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Wien, Österreich
E-Mail: Thomas.Jakl@bmlfuw.gv.at

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

M. Sietz (Hrsg.), *Wärmefußabdrücke und Energieeffizienz*,
DOI 10.1007/978-3-662-49935-1_1

Fleissner und Hofkirchner 1997). So hatte und hat der Umweltschutz Mühe, als eigene Kernkompetenz zu bestehen und seine Konturen im Nachhaltigkeitsnebel sichtbar zu machen. Bojanowski (2014) kommt gar zu dem Schluss: „Der Begriff Nachhaltigkeit verführt leicht zum Etikettenschwindel, der in der Umweltpolitik durchaus üblich ist, meist ohne betrügerisch gemeint zu sein." Eine Tendenz, die sich mit dem Aufkommen der Resilienz als Leitbild noch verstärkt. Man möge doch die Widerstandsfähigkeit von (Öko-)Systemen erforschen und dabei erheben, wie lange gegenwärtige Belastungen noch verkraftet werden können – so die Resilienz-Botschaft auf den Punkt gebracht. Ehe also aus dem allumfassenden Substrat der Nachhaltigkeit ein zartes Pflänzchen des Umweltschutzes aufkeimen darf, habe geklärt zu werden, ob die potenziell gefährdeten Organismen und Lebensgemeinschaften die zu bekämpfenden Belastungen nicht ohnehin noch eine Zeitlang ertragen würden und die erwogene Maßnahme nicht tunlichst aufzuschieben wäre. Vom vorsorgenden Umweltschutz über die Beliebigkeit also zur Resignation?

1.3 Der Mensch rückt ins Zentrum der Umweltpolitik

Diese Tendenz war verbunden mit einer zunehmenden Anthropozentrierung der Umweltproblematik. Schon die Definition von nachhaltiger Entwicklung im sog. „Brundtland-Bericht" („Our Common Future", von der UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung unter Vorsitz der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland verabschiedet) trägt diesen Keim in sich, wenn es heißt: „Dauerhafte Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können" (UN 1987). Die Befriedigung menschlicher Bedürfnisse ist also das Maß aller Dinge und damit der ausschlaggebende Orientierungspunkt für die Politik. In weiterer Folge waren zahlreiche Instrumente und Maßnahmen, die dem klassischen Umweltschutz zuzurechnen sind, erst durchsetzbar, als auch deren Bedeutung für den Schutz der menschlichen Gesundheit ausreichend darstellbar war. So stieg die Ozonschicht in unserer Wertschätzung ungemein, als bekannt wurde, dass sie Schutz vor den krebserregenden UV-Strahlen bietet. Umweltpolitische Großvorhaben, wie etwa die neue EU-Chemiepolitik REACH, waren erst durch einschlägige Befunde, die die menschliche Belastung durch Industriechemikalien dokumentierten, durchsetzbar. Dieser anthropozentrischen Ausrichtung folgend, griff auch eine Bewertung der Schutzgüter um sich, die jene Einheit ins Zentrum stellte, die für uns Menschen offensichtlich die deutlichste Sprache spricht: Geld. Einzelne Arten, Lebensräume, Ökosysteme, ja das menschliche Leben selbst – nichts wurde von der gnadenlosen Monetarisierung ausgenommen, selbst wenn es dabei um Schutzgüter ging, deren Wert sinnvoll nur mehr beschreibend, qualifizierend erfassbar ist.

1.4 Entropie als Indikator für „Qualität“

Die Bewertungsinstrumentarien und -modelle der Umweltwissenschaften stoßen endgültig dort an ihre Grenzen, wo qualitative Kriterien die einzig maßgeblichen sind. Dies gilt für Fragestellungen des Natur- und Landschaftsschutzes, für die Gefährdung der Artenvielfalt oder auch bei der vergleichenden Bewertung von endlichen bzw. regenerierbaren Rohstoffen. In Problemstellungen wie diesen versagt den Naturwissenschaften allzu früh die Stimme, und das Feld wird allzu leichtfertig den Argumenten der Ethik oder dem Urteil anthropozentrischer Wertmaßstäbe überlassen. „Wir vernichten Ressourcen von morgen“ oder „Wir sägen an dem Ast, auf dem wir sitzen“: Dies alles sind Befunde, mit denen die naturwissenschaftliche Ebene verlassen wird, ohne die entropischen Effekte und damit den eigentlichen Hauptindikator der Nachhaltigkeit betrachtet zu haben. Wird eine Fläche Regenwald durch eine Plantage „ersetzt“, so wird der Verlust nicht offensichtlich, wenn man bloß Parameter wie Gasstoffwechsel der Pflanzen oder die Menge an entstehender Pflanzenmasse betrachtet. Ein hochkomplex strukturiertes Ökosystem, unermesslich reich an Vernetzungen zwischen Organismen verschiedenster Entwicklungsstufen, wird ersetzt durch die blanke „Phytodiktatur“. Der Gesamtvorgang wird erst durch die Betrachtung der Entropieniveaus fassbar. Die bloße Analyse der Stoffströme ist in diesem Fall ähnlich aufschlussreich wie die Beurteilung der Gemälde der Sixtinischen Kapelle nach der Menge an aufgetragener Farbe.

Geordnete Strukturen entstehen nie bloß aus sich heraus. Ihr Zustandekommen muss durch Energiezufuhr „erkauft“ werden. Dies wiederum hat aber nun eine Entropiezunahme – durch den Abbau geordneter Strukturen – bei ihrer Nutzung zur Folge. Ein echtes Dilemma, in dem das Universum da steckt und an dessen Ende das Erliegen des Strukturabbaus im Wärmetod lauert. Die Biosphäre ist ein Bollwerk gegen den Abbau von Ordnung und die Akkumulation von „Unordnung“ auf dem Globus. Die Assimilation von Kohlenstoff unter Nutzung des Sonnenlichtes durch Pflanzen (Photosynthese) erlaubt die Bildung organischer Moleküle auf Basis der weniger geordnet in der Geosphäre verteilten Rohstoffe Wasser und Kohlendioxid. Ein Prozess, der am Anfang aller Nahrungsketten steht und letztendlich alle Lebensformen speist. Erwin Schrödinger (1951) formuliert knapp: „Das Leben zehrt von niedriger Entropie.“ Der Wiener Stoffwechselphysiologe Helmut Kinzel (1977) präzisiert: „Gehen wir dem Ursprung der organischen Nahrung nach, dann stoßen wir auf die Tätigkeit der Pflanzen, die zum Aufbau ihres Organismus aus anorganischen Substanzen Strahlungsenergie benötigen, die von der Sonne her kommt. Dort entsteht sie bei Fusionsvorgängen von Atomkernen, bei denen Materie in Energie verwandelt wird. Diese Vorgänge stellen eine außerordentlich starke Erhöhung der Entropie dar. In dem System (Erde + Sonne) findet also, wenn man Bilanz über alle darin ablaufenden Vorgänge zieht, eine Vermehrung von Entropie statt, wenn auch in kleinen, offenen Teilen dieses Systems, nämlich in den Organismen, auf Kosten von aufgenommener Energie Ordnungszustände aufgebaut werden, d. h. also die Entropie vermindert wird.“

Der Schweizer Ökonom Mathias Binswanger (1994) bringt es auf den Punkt: „Ohne das Entropiegesetz kann die Umweltproblematik nicht in ihrer ganzen Dimension erfasst werden, da ohne Beachtung der Irreversibilität zumindest theoretisch alle Umweltschäden wieder beseitigt werden könnten. Das Entropiegesetz sagt uns aber gerade, dass dies nicht möglich ist. Die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen sind eindeutig. Die Nutzung natürlicher Ressourcen muss möglichst über die ökologischen Kreisläufe erfolgen, da in diesen Recycling mit Hilfe der Sonnenenergie ohne zusätzliche Entropieerhöhungen erfolgt.“ Was natürlich, dies sei zur Vollständigkeit erwähnt, nur seine Richtigkeit behält, wenn man die Sonnenenergie selbst nicht in Prozessen einsetzt, die ihrerseits Entropie „produzieren“, indem Strukturen zerstört oder Stoffe fein verteilt freigesetzt werden.

1.5 Die Entropie aus verschiedenen Blickwinkeln – Konsequenzen für ihre Rolle in der Umweltdiskussion

Mit Boltzmann und Schrödinger waren es zwei große österreichische Physiker, deren Namen untrennbar mit dem Entropiebegriff verbunden sind. Aber selbst ihre Zugänge sind bereits unterschiedlich und betrachten verschiedene Ausprägungen, Rollen, Erscheinungsformen dieser Größe. Auch die Wirtschaftswissenschaften und die Soziologie entwickelten eigene Begrifflichkeiten und Denkschulen, in denen der Entropie ein besonderer Stellenwert eingeräumt wird. Wie soll ein derartig vielgestaltig verwendeter Begriff einen Beitrag zur Konkretisierung der Nachhaltigkeitsdebatte leisten? Nun, analysiert man die Versuche, zu einer eingängigen Definition von Entropie zu gelangen, so gelangt man, nachdem man zahllose Fehlversuche verworfen hat, ungefähr zu folgender Formulierung:

> Entropie ist ein Maß für den Grad an materieller Durchmischung und für entstandene nicht nutzbare Energie.

Materielle Durchmischung steht für nichts anderes als für Dissipation von Stoffströmen, Kontamination von Umweltmedien, Verdünnung von Ressourcen anstatt kreislaufartiger Wirtschaftsstrukturen; „Entstehung nicht nutzbarer Energie“ andererseits führt zum zweiten großen Kernproblem der Industriegesellschaft: „Energieversorgung“, „Energieeffizienz“ und „Energiemix“ sind daran anschließende Stichwörter. Es wird also offensichtlich, dass uns die Betrachtung der Entropiezunahme zum Wesenskern der Beurteilung von Prozessen und Produkten führt, wenn deren Eignung für einen langfristig aufrecht erhaltbaren Wirtschaftsstil im Vordergrund stehen soll. Schrödingers Dictum „Das Leben zehrt von niedriger Entropie“ weist dann noch zusätzlich in die Richtung, dass es nur die Orientierung auf die Nutzung der Sonnenenergie ist, die uns erlaubt, der naturgesetzlich in geschlossenen Systemen vorgegebenen Entropiezunahme entgegenzusteuern, da es sich beim System Erde unter Einbeziehung der Sonne ja um ein offenes System handelt.

1.6 Entropiebetrachtung stößt ein Fenster auf mit Blick auf den Wesenskern der Nachhaltigkeitsfrage

Macht man sich auf die Suche nach dem Gemeinsamen in all den Konzepten, in die Entropie Einzug gefunden hat, so beschreibt Entropiezunahme stets „Verlust". Verlust an nutzbarer Energie, Verlust an Struktur, Verlust an Information – und letztlich Verlust an Qualität. Ein Blick auf die Entwicklung der Entropie bei der Beurteilung von Prozessen und Produkten schärft den Blick in einer Weise, die konventionelle Konzepte der Bewertung nicht zu leisten vermögen. Die zahlreichen etablierten Konzepte zur Bewertung von Verfahren und Produkten machen deren Auswirkungen in Form von Stoffflüssen oder Energiebilanzen deutlich – die Monetarisierung der Effekte bringt die Befunde in Einklang mit wirtschaftsbezogenen Wertmaßstäben. Eine Vielzahl von Indikatoren verschafft heute nahezu lückenlosen Einblick in die Auswirkungen auf die Ökosphäre, aber eben nur nahezu. Geht es um die Beurteilung qualitativer Aspekte oder um die grundsätzliche Ausrichtung eines Verfahrens, stoßen konventionelle Maßstäbe an ihre Grenzen. Verlust an Artenvielfalt, Verlust an Bündelung und Beherrschbarkeit von Stoffströmen, Verlust an Freiheitsgraden bei der Nutzung von Energie, Verlust an „gewachsenen" Strukturen …

Die einzelnen Schauplätze der globalen ökologischen Krise haben auch ihre entropischen Facetten. So ist beispielsweise die Nutzung fossiler Energieträger einerseits verknüpft mit der Umwandlung von einer Energieform in eine andere, was untrennbar mit einer Entropiezunahme verbunden ist. Weiterhin geht damit untrennbar die Freisetzung von CO_2-Molekülen in die Atmosphäre einher und damit gleichzeitig ein Verlust an geordneten Strukturen. Spendet heute ein Stück brennende Kohle Wärme oder wird im Ottomotor das Benzin-Luft-Gemisch entzündet, so wird in diesem Moment Kohlenstoff, der einer Erdatmosphäre vor Millionen von Jahren entzogen wurde, in jene der Gegenwart freigesetzt. Die Energiedienstleistungen, die den Wohlstand der zivilisierten Welt begründen, werden durch die Zerstörung von molekularen Strukturen befriedigt, für deren Entstehung Kernfusionen in der Sonne des Erdaltertums jene Energie lieferten, welche die Pflanzen dieser Zeit photosynthetisch nutzten. Ein Vorgang, der neben seiner Verantwortlichkeit für den anthropogenen Treibhauseffekt uns durch den inhärenten Strukturabbau der Entropiemaximierung Schritt für Schritt näherbringt.

Nach Binswanger respektive Rechberger und Graedel (2002) lassen sich folgende drei Entropiebegriffe unterscheiden:

1. Der phänomenologische Entropiebegriff der Thermodynamik (nach Clausius) definiert Entropie für reversible Prozesse auf makroskopischer Ebene in Systemen, die durch thermodynamische Zustandsvariablen beschrieben werden.
2. Der Entropiebegriff der statistischen Mechanik (nach Boltzmann) definiert Entropie auf molekularer Ebene mithilfe des Wahrscheinlichkeitsbegriffs.
3. Der informationstheoretische Entropiebegriff (nach Shannon) begreift Entropie als potenzielle Information – als ein Maß dafür, was man über ein System wissen könnte, aber zurzeit noch nicht weiß.

Stumm und Davis (1974) ordnen diesen drei Begriffen große Cluster der Umweltproblematik zu. Der thermodynamische Entropiebegriff unterstützt demnach Beurteilungen von energetischen Transformationsprozessen. Die informationstheoretische Natur des Entropiebegriffs erschließt die Bewertung ökologischer Informationsübermittlungen, die mit einer Störung von Ökosystemen einhergehen können, beispielsweise die Abnahme der genetischen Information durch Ausrottung von Arten. Schließlich beleuchtet der statistische Entropiebegriff auch das Teilproblem der „Misch- und Verdünnungsentropie" und bezieht sich auf die durch wirtschaftliche Aktivitäten verursachte Aufsplitterung konzentrierter, homogener Stoffströme in kleinere Teilströme, die dann Bestandteil heterogener Mischströme werden und so zu einer Schadstoffbelastung für die Umwelt werden können (Stumm und Davis 1974; Pastowski 1994). Die Miteinbeziehung der Entropie in diesen drei Erscheinungsformen in die Beurteilung von Produkten, Prozessen und Maßnahmen eröffnet völlig neue Blickwinkel und ermöglicht objektive Bewertungsansätze auch dort, wo heute „nur" Maßstäbe ethischer Natur herangezogen werden oder Modelle mit unzureichender Grundlage willkürliche Bewertungen liefern. Die Information, der strukturell-konzeptive Aufwand, der in Produkten, Verfahren und Strukturen steckt, fließt in kaum eine konventionell erstellte, die Entropie vernachlässigende Betrachtung ein. Die Erhaltung der stofflichen und strukturellen Qualität ist als Umweltgut nicht – oder nur in Ansätzen – etabliert (etwa als Kritikelement am „Downcycling", bei welchem durch immer heterogenere Zusammensetzung des Recyclats auch nur immer minderwertigere Nutzungsformen erschließbar sind). Der Wert des Gutes „stoffliche oder strukturelle Qualität" ist aber weder energetisch noch monetär sinnvoll erfassbar. Hier eröffnet die Betrachtung der Entropiezunahmen einen neuen Blick und macht diesen Wert ein Stück weit erschließbar. Der Umweltökonom Andreas Pastowski (1994) hält dazu fest: „Das Entropiegesetz ermöglicht somit die Thematisierung des Ausmaßes an materieller und energetischer Dissipation nicht regenerierbarer Ressourcen im Wirtschaftsprozess über die von den relativen Preisen ausgehendem Signale hinaus. Dies liegt daran, dass der qualitative Zusammenhang zwischen Ressourcenabbau, Ressourcenkonzentration und dem für den Ressourcenabbau und die Rohstoffanreicherung erforderlichen Materie- und Energieaufwand teilweise mit dem Entropiegesetz erklärt werden kann."

Innerhalb der OECD (2011) wird dieser Ansatz seit Kurzem zumindest diskutiert. Die OECD-Arbeitsgruppe zu „Umweltinformation" setzt sich mit einem Hintergrunddokument zu „Indikatoren zu Stoffströmen und Ressourcenproduktivität" auseinander. Neben einer Reihe anderer Faktoren wird bei Erzen und Industrierohstoffen der Entropie (als geradezu verschämte Anmerkung in einer Tabelle am Ende des Dokuments) ein gewisser Stellenwert im Zuge einer umweltorientierten Betrachtung eingeräumt. Ein zaghafter erster Beginn, mehr nicht.

1.7 Ein neues Paradigma für die Wirtschaft

Preise sind Kinder des Marktes und werden von Angebot und Nachfrage gesteuert. Die „Bepreisung" (Monetarisierung) von Maßnahmen, Prozessen und Effekten,

aber auch von Schutzgütern (vom einsamen Weiher bis zum Menschenleben), hat daher durch die zumindest indirekte Abhängigkeit vom Marktgeschehen zwangsläufig etwas Willkürliches. Hall et al. (2001) stellen in ihrer Kritik am neoklassischen Wirtschaftskonzept fest, dass aktuelle Modelle zur Bewertung von Wirtschaftsgütern und zur wirtschaftlichen Leitungsfähigkeit in hohem Ausmaß fehlerbehaftet sind, vor allem was die Berücksichtigung naturwissenschaftlicher Fakten und Gegebenheiten betrifft. Weder wird die tragende Rolle energetischer und materieller Ressourcen im Wirtschaftsgeschehen in diesen Modellen ausreichend abgebildet, noch werden deren Endlichkeit und mangelnde Effizienz bei deren Einsatz adäquat berücksichtigt, was insbesondere für die Preisbildung gilt (Hall et al. 2001). Das Entropiegesetz ermöglicht eine Thematisierung des Ausmaßes an materieller und energetischer Dissipation nicht regenerierbarer Ressourcen im Wirtschaftsprozess über die von den relativen Preisen ausgehenden Signale hinaus. Dies liegt daran, dass der qualitative Zusammenhang zwischen Ressourcenabbau, Ressourcenkonzentration und dem für den Ressourcenabbau und die Rohstoffanreicherung erforderlichen Materie- und Energieaufwand teilweise mit dem Entropiegesetz erklärt werden kann (Faber et al. 1983, zit. nach Pastowski 1994, S. 228).

Der Mathematiker und Wirtschaftswissenschaftler Nicholas Georgescu Roegen wies in den 1970er Jahren erstmals auf den entropischen Charakter des ökonomischen Prozesses hin. „Der Wirtschaftsprozess“, so schrieb Georgescu Roegen (1974) „ist kein Kreislauf, er besteht aus der kontinuierlichen Umwandlung von niedriger in hohe Entropie, also in nicht wiederverwertbaren Abfall oder um einen geläufigen Begriff zu verwenden, in Umweltverschmutzung.“ Er brandmarkt den blinden Fleck, den die Ökonomie hinsichtlich der Miteinbeziehung der Entropie hatte und findet Beweise dafür in „Ideen, die die verschiedenen Autoritäten in Sachen Verschmutzung uns zu verkaufen suchen: Einerseits Maschinen und Verfahren, die keinen Abfall produzieren und andererseits Erlösung durch unaufhörliches Recycling des Abfalls. Es sei nicht geleugnet, dass wir, wenigstens im Prinzip, sogar das im Sand der Meere zerstreute Gold recyceln können, doch müssten wir dabei auf eine zusätzliche Menge niedriger Entropie (z. B. Energie in Form fossiler Brennstoffe) zurückgreifen, die viel größer ist als jene, die im rezirkulierten Material vorhanden sein wird. Kostenloses Recycling gibt es ebenso wenig wie Industrie ohne Abfall“.

Der Kern der entropischen Betrachtung der weltweiten Wirtschaftsmechanismen durch Georgescu Roegen (1982) besteht in der Erkenntnis, dass das Ausmaß der Dissipation von Materie und Energie aus nicht regenerierbaren Quellen im Zuge des Wirtschaftsprozesses die zukünftigen physikalischen Verfügbarkeiten von Materie- und Energieformen definiert. Damit ist es auch dieses Ausmaß an Entropieerhöhung, das über deren Eignung Auskunft gibt, als Input des Wirtschaftsprozesses verwendet zu werden.

Kurz formuliert lautet die von ihm selbst formulierte Übertragung des Entropiegesetzes auf die Materie „Ein Recycling von nicht verfügbarer Materie ist unmöglich“ oder „Ein geschlossenes System (ein System, das keine Materie mit der Umgebung austauscht) kann nicht unbegrenzt konstante Arbeit verrichten“ (Roegen 1982).

Binswanger (1994) entwickelt Georgescu Roegens (1976) Ansatz weiter und gelangt zu folgendem Schluss: „Das ökonomische System funktioniert heute weitgehend außerhalb der Kreisläufe des Ökosystems und braucht deshalb eine große Menge zusätzlicher niedriger Entropie, die in diesen Ausmaßen nur von nicht erneuerbaren Ressourcen stammen kann. Die damit verbundene Entropieerhöhung in Form von Abwärme und Schadstoffen in der Umwelt kann zu einem großen Teil nicht mehr durch natürliches Recycling ausgeglichen werden. Ganz im Gegenteil kommt es zu irreversiblen Störungen des Ökosystems, was den entropischen Charakter der Wirtschaftsprozesse ausmacht. In diesem Sinne wird Entropie von vielen Ökonomen und Ökologen als eine irreversible Entwertung der Natur durch wirtschaftliche Prozesse verstanden. Energie und Materie werden durch die wirtschaftlichen Prozesse von verfügbaren Formen (nutzbare Ressourcen) in nicht mehr verfügbare Formen (Abfälle) umgewandelt."

1.8 Schlussbetrachtung

Der „Einklang mit ökosphärischen" Stoff- und Energieflüssen gilt als Grundvoraussetzung für einen Lebens- und Wirtschaftsstil, der auch langfristig aufrecht erhaltbar ist. Nun finden sich zahllose „natürliche" Beispiele für Stoff- und Energieflüsse in der Ökosphäre, die sich kaum in das Paradigma der Zukunftstauglichkeit fügen – denken wir nur an Emissionen bei Vulkanausbrüchen oder an natürliche Waldbrände oder andere Naturkatastrophen. Der Wesenskern der Ökosphäre, auf dem unsere Zivilisation aufbauen muss, ist die Nutzung der Sonnenenergie als Motor der Stoff- und Energieflüsse und als Spender für niedrige Entropie. Die Erhaltung und Schonung von Strukturen, von Informationen, von verwertbarer Energie und anderen „Qualitäten" müssen als zusätzliches Bewertungselement von Produkten und Verfahren etabliert und demnach auch als Wert geschätzt und zum gesellschaftlichen Anliegen werden. Ein Ziel, das nicht durch subjektives Bepreisen (Monetarisierung), welches ja selbst einem ständigen Wertewandel ausgesetzt ist, erreichbar ist, sondern einer Miteinbeziehung der Entropie als Beurteilungsgröße bedarf.

Binswanger (1994) schreibt dazu: „Solange eine Wirtschaft sich auf erneuerbare Ressourcen stützt und diese nicht übernutzt, d. h. solange sie im Einklang mit den ökologischen Kreisläufen funktioniert, stellt die Entropie kein spezifisches Problem des Wirtschaftsprozesses dar. Das ökonomische System ist dann wie die übrigen offenen Systeme ein Teil des gesamten Ökosystems der Erde, dessen Outputs anderen Systemen wieder als Input dienen. Erst die extensive Nutzung der nicht erneuerbaren Ressourcen seit der industriellen Revolution hat die Entropie zu einem globalen Problem werden lassen, dessen Folgen heute immer deutlicher erkennbar werden."

Erneuerbare Quellen wie Solarenergie, Wind- und Wasserkraft für Energiebereitstellung zu nutzen, Biomasse als Industrierohstoff einzusetzen oder auf die Erhaltung der Qualität im Stoffstrommanagement zu achten, ist also nicht bloß „klug" oder „verantwortungsvoll" und auch nicht bloß „klimafreundlich", sondern ist schlichtweg der einzige Weg, den Energiefluss der Sonne für einen Wirtschaftsstil zu nutzen, der nicht „Entropiemüll" anhäufen muss. Echte Umweltschutzmaßnahmen sind Entropie-Inflationsbremser.

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

2

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:

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