

Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Methodik und Implikationen für die Gestaltung einer energieeffizienten Produktion

*(Cumulative energy demand (CED) –
Methodology and implications for the
design of an energy-efficient production)*

Sygulla, R.¹; Götze, U.¹

¹ TU Chemnitz, Professur Unternehmensrechnung und Controlling

Abstract

Das Konzept des Kumulierten Energieaufwands (KEA) führt die ökologische Wirkung eines Produkts auf die für seine Herstellung, Nutzung und Entsorgung notwendigen Energieaufwendungen zurück und berücksichtigt dabei neben den unterschiedlichen eingesetzten Energieformen auch deren individuelle Vorgeschichte. Im vorliegenden Beitrag wird das Konzept überblicksartig dargestellt und kritisch bewertet. Zudem wird der Frage nachgegangen, in welcher Form die KEA-Methodik die energiebezogenen Analysen im Projekt eniPROD unterstützen kann.

The approach of the cumulated energy demand (CED) traces the ecological impacts of products back to the entire energy consumption which is necessary for its production, use, and disposal. It considers not only the different forms of energy used, but also their individual history of creation. This article provides an overview of the approach and a critical discussion. Beyond that, it focuses on the question, in which form the CED approach can support the energy-related analyses in the Cluster of Excellence eniPROD.

Keywords:

Kumulierter Energieaufwand (KEA), Bewertung ökologischer Wirkung, eniPROD
Cumulated energy demand (CED), evaluation of ecological impacts, eniPROD

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, 2013.
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

1 Einleitung

Die Notwendigkeit, Produkte und Produktionsprozesse umweltverträglicher als bisher zu gestalten, ist unbestritten. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden eine Reihe von Konzepten und Instrumenten entwickelt, die die Wirkung von Produkten und Prozessen auf die natürliche Umwelt analysieren und anhand ausgewählter Indikatoren bewerten. Detaillierte Instrumente wie die Ökobilanz [1] ermöglichen ein sehr umfassendes Bild, verursachen allerdings auch einen entsprechend hohen Aufwand. Andere Ansätze verringern den Erhebungsaufwand, indem die ökologische Wirkung mit Hilfe nur eines einzelnen Indikators abgeschätzt wird [2]. Der prominenteste Vertreter dieser vereinfachenden Ansätze ist das KEA-Konzept. Für die Bewertung der Umweltwirkung eines Produkts wird im Rahmen der Berechnung des KEA die Summe aller Energieaufwendungen, die im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts anfallen, herangezogen [3]. Die sogenannte primärenergetische Bewertung des Konzepts ermöglicht es, Energien unabhängig von ihrer Erscheinungsform auf eine einheitliche Basis zurückzuführen und auf diese Weise vergleichbar zu machen [2].

Im Folgenden soll das KEA-Konzept vor dem speziellen Energiefokus des Projektes eniPROD näher untersucht werden. Für eine überblicksartige Darstellung werden zunächst, in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600, die wesentlichen Merkmale des Konzepts, seine Grundbegriffe sowie das Vorgehen bei der Berechnung des KEA erläutert. Ausgehend von einer kritischen allgemeinen Würdigung dieses Basiskonzepts (gemäß VDI-Richtlinie) werden schließlich die spezifischen Anwendungsmöglichkeiten des KEA in Bezug auf das eniPROD-Projekt untersucht.

2 Basiskonzept nach VDI-Richtlinie 4600

2.1 Grundbegriffe und Elemente

Das **KEA-Konzept** unterstellt, dass sich die ökologische Wirkung eines Produkts über seinen Lebenszyklus hinweg durch die Kumulation der anfallenden Energieaufwendungen abbilden lässt.¹ Diese umfassen alle energetischen Aufwendungen, die „im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes [...] entsteh[en] bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden“ können und sich damit sowohl auf eingesetzte Energieträger als auch auf Stoffe, die in die Produkte eingehen, beziehen [3]. Der Betrachtungsraum des Konzepts

¹ Neben Produkten können mit Hilfe des KEA-Konzepts auch einzelne Produktkomponenten, Dienstleistungen, Produktionsprozesse oder Ressourcen sowie, aus volkswirtschaftlicher Perspektive, Stoffgruppen und Wirtschaftsräume bewertet werden. Aus Gründen der Vereinfachung beziehen sich die folgenden Ausführungen lediglich auf die Betrachtung von Produkten.

reicht gemäß der obigen Definition von den Lagerstätten der Energieträger und Stoffe bis hin zur endgültigen Deponierung. Obwohl die Energieaufwendungen selbst keinen direkten umweltschädigenden Einfluss haben, können sie dennoch als Indikator für eine Reihe von Umweltwirkungen (bspw. den Ressourcenverzehr oder die Emission von Treibhausgasen) dienen [4].

Zu den kumulierten Energieaufwendungen zählen zum einen die sogenannten **direkten Energieaufwendungen**, die für die Prozesse der Herstellung, Nutzung und Entsorgung des untersuchten Produkts bzw. für die Bereitstellung der eingehenden Stoffe und Energien anfallen. Zum anderen werden aber auch die sogenannten **indirekten Energieaufwendungen** im KEA erfasst. Sie beinhalten alle Aufwendungen, die im Zusammenhang mit der Bereitstellung der für die Prozesse notwendigen Infrastruktur (Gebäude, Anlagen etc.) entstehen. Hierzu zählen z. B. Energieaufwendungen für die Errichtung von Gebäuden, für die Wartung von Maschinen oder für die Bereitstellung von Betriebsstoffen, welche nicht in das Produkt eingehen [3].

Da die eingesetzten Energien (genauer die Energieträger) selbst einen vorgelagerten Herstellungsprozess durchlaufen haben, müssen die in diesem angefallenen Energieaufwendungen ebenfalls berücksichtigt werden. Das KEA-Konzept spricht hier von der „primärenergetischen Bewertung“ von Energieträgern, auf die später noch näher eingegangen wird. Die derart bewerteten und somit vereinheitlichten Energieaufwendungen können anschließend kumuliert und dem zu untersuchenden Objekt (hier: dem Produkt) zugerechnet werden [5]. Die VDI-Richtlinie nennt das zu untersuchende Objekt, auf das sich der berechnete KEA-Wert bezieht, „funktionelle Einheit“ (fE) und definiert die Dimension des KEA als Joule pro funktionelle Einheit (J/fE) [3].

Tabelle 1 zeigt das Beispiel einer differenzierten KEA-Betrachtung der Herstellung von Kraftstoffen aus Holz (Biomass to Liquid – BtL). Hier wird sowohl nach den Einzelprozessen der Herstellungsphase als auch nach der Art der Erzeugung der eingesetzten Energieträger (erneuerbar/nicht-erneuerbar) unterschieden. Derartige „Energiebilanzen“² zur Bewertung der ökologischen Wirkung von Produkten wurden bereits seit den 1970ern erstellt, ein konkretes Rechenmodell entstand jedoch erst 1995 mit der VDI-Richtlinie 4600 [2]. Darüber hinaus beschreibt diese als eine der wenigen Quellen das KEA-Konzept ausführlich. Die folgende Darstellung der Grundbegriffe und des Vorgehens bei der Berechnung lehnt sich daher weitgehend an die aktuelle Fassung dieser Richtlinie an.

² Die Literatur verwendet im Zusammenhang mit der KEA-Berechnung häufig die Begriffe der „Bilanz“ bzw. der „Bilanzierung“ (vgl. bspw. [2, 3, 5]), obwohl die für eine Bilanz typische Gegenüberstellung von Wertekategorien (hier könnten dies bspw. Input und Output oder Aufwand und Nutzen sein) fehlt. Es bleibt zu vermuten, dass mit den Begriffen eine möglichst vollständige Betrachtung/Bewertung signalisiert werden soll. Im Folgenden wird auf die Verwendung des Bilanzbegriffs verzichtet.

Tabelle 1: Differenzierte KEA-Betrachtung der Herstellung von Kraftstoffen aus Holz (verkürzt und leicht modifiziert übernommen aus [6])

BtL aus Holz	Kumulierter Energieaufwand (KEA) [$TJ_{\text{primär}}/TJ_{\text{end}}$]		
	<i>nicht-erneuerbar</i>	<i>erneuerbar</i>	Summe
Holzanbau	0,07	1,81	1,87
Transport Holz	0,00	0,00	0,00
Hackschnitzel-Herstellung	0,03	0,00	0,03
Transport Hackschnitzel	0,01	0,00	0,01
BtL-Verfahren	0,02	0,00	0,02
Summe	0,13	1,81	1,94

Die in den verschiedenen Lebenszyklusphasen anfallenden Energieaufwendungen lassen sich auf den Einsatz von Energieträgern zurückführen. Diese haben, wie erwähnt, vor ihrem Einsatz selbst eine vorgelagerte Kette von Bereitstellungsprozessen – von der Exploration über die Förderung der Primärenergieträger, Transporte und die Aufbereitung/Umwandlung bis hin zur Verteilung – durchlaufen. Mit Hilfe des **Bereitstellungsnutzungsgrades (g)** können die damit verbundenen Energieaufwendungen in die KEA-Berechnung einbezogen werden (primärenergetische Bewertung). Vergleichbar einem Wirkungsgrad setzt diese Kennzahl die am Einsatzort verfügbare Endenergie ins Verhältnis zur Summe der für ihre Bereitstellung insgesamt notwendigen Energieaufwendungen (Formel 1) [3].

$$g = \frac{\text{am Einsatzort verfügbare Endenergie}}{KEA_{\text{Bereitstellung}}} \quad (1)$$

Je nach genutztem Energieträger kann die Endenergie mit Hilfe des jeweiligen Heiz- oder Brennwertes bzw. im Fall von elektrischer Energie mit der (möglichen) elektrischen Arbeit ausgedrückt werden. Die VDI-Richtlinie unterscheidet in diesem Zusammenhang nicht zwischen Energien, die an physische Energieträger gebunden sind, und elektrischer Energie. Allerdings schließt sie die Betrachtung menschlicher Arbeit und metabolischer Energie explizit aus. Umweltenergien (bspw. passiv genutzte Solarenergie) sollen „in der Regel“ ebenso nicht berücksichtigt werden [3].

Wie bereits oben angedeutet, werden die Energieaufwendungen auf den Einsatz von Energieträgern zurückgeführt. Dies führt zu der Frage, wie Stoffe bewertet werden, die einerseits stofflich genutztes Material und andererseits Energieträger sind, bspw. in der Petrochemie eingesetztes Erdöl. Die KEA-Berechnung (nach VDI-Richtlinie) umgeht die teils schwierige Differenzierung. Die energetische Nutzung von Energieträgern wird in Form des **Kumulierten Prozessenergieaufwands**

(KPA) erfasst und ihre stoffliche Verwendung als **Kumulierter Nichtenergetischer Aufwand (KNA)** berücksichtigt (vgl. Formel 2). Der KNA beinhaltet neben dem Bereitstellungsaufwand des stofflich genutzten Energieträgers auch dessen energetisch nutzbares Potenzial (z. B. seinen Brennwert) [3].

$$KEA_{Gesamt} = KPA + KNA \quad (2)$$

Der KPA berechnet sich aus der Summe aller mit ihrem jeweiligen Bereitstellungsnutzungsgrad bewerteten, eingesetzten **Endenergien (EE)**. Die VDI-Richtlinie differenziert den KNA in den sogenannten **Nichtenergetischen Verbrauch (NEV)** (von in der nationalen Energiestatistik ausgewiesenen Energieträgern) sowie den sogenannten **Stoffgebundenen Energieinhalt (SEI)** (von solchen Energieträgern, die in dieser Statistik nicht ausgewiesen sind, wie bspw. als Werkstoff eingesetzte Biomasse). Formel 3 zeigt die entsprechend detaillierte Berechnungsvorschrift des Gesamt-KEA [3]:

$$KEA_{Gesamt} = \sum_{i=1}^l \left(\frac{EE_i}{g_i} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{NEV_j}{g_j} \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{SEI_k}{g_k} \right) \quad (3)$$

Wie bereits zu Beginn des Abschnitts erwähnt, berücksichtigt die KEA-Berechnung den gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Um die Aussagekraft des KEA zu erhöhen, empfiehlt die VDI-Richtlinie die Differenzierung des Gesamt-KEA nach den drei Lebenszyklusphasen **Herstellung (KEA_H)**, **Nutzung (KEA_N)** und **Entsorgung (KEA_E)**, wobei die ermittelten „Teil“-KEAs alle der jeweiligen Phase zuzurechnenden direkten und indirekten Energieaufwendungen umfassen [3].

2.2 Betrachtungsraum und Vorgehen

Die KEA-Berechnung erhebt den Anspruch auf eine Betrachtung „vom Rohstoff in der Lagerstätte bis zur Endlagerung bzw. Deponierung aller [...] Stoffe“ [3]. Um den KEA eindeutig bestimmen zu können sowie die Komplexität der einzubeziehenden Wertschöpfungsketten und den entstehenden Aufwand zu begrenzen, ist es notwendig, zunächst eine **Systemabgrenzung** vorzunehmen. Diese umfasst, wie in Bild 1 dargestellt, neben der Definition von Inputs (extern bezogene Energien, Werkstoffe, Halbzeuge etc.) auch die mögliche Ausgrenzung von in anderen (systemfremden) Prozessen nachgenutzten Stoffen und Energien (Outputs, bspw. thermische nachverwertete Reststoffe). Darüber hinaus müssen geeignete „Abschneidekriterien“ [3] für die Einbeziehung relativ geringfügiger Energieaufwendun-

gen gefunden werden.³ Da eine allgemein gültige, objektive Systemabgrenzung nicht in jedem Fall möglich ist, sollten die gewählten Kriterien immer explizit angegeben werden, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten [3, 7].

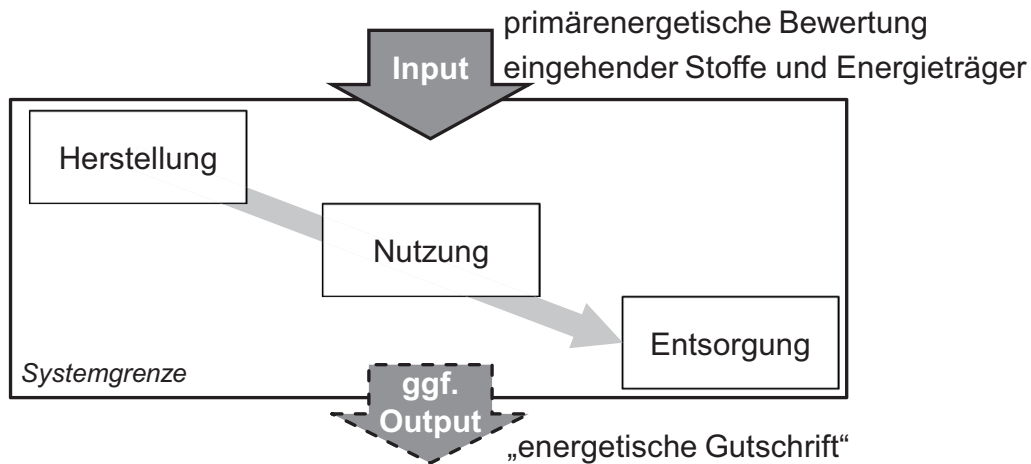


Bild 1: Systemabgrenzung bei der KEA-Berechnung (eigene Darstellung, in Anlehnung an [3])

Die **Erfassung von Inputströmen** (aus vorgelagerten Produktionsprozessen, Energiebereitstellungsprozessen) stützt sich in der Praxis zumeist auf existierende Datenbanken (bspw. [8]), die auf Stoffgruppen und Regionen bezogene, gesamtwirtschaftliche Durchschnittswerte liefern. Die zu erfassenden **Outputströme** beinhalten alle Stoff- und Energieströme, die den Betrachtungsraum verlassen und in anderen Prozessen stofflich oder energetisch eingesetzt werden. Da diese Stoffe und Energien bei gegebenen Prozessen der Produktherstellung, -nutzung und -entsorgung zwangsläufig anfallen, ist ihr Herstellungsaufwand dem betrachteten System (Produkt) zuzurechnen. Der Nutzen, der durch sie in Prozessen außerhalb der Systemgrenze erzielt wird, fließt in Form einer energetischen Gutschrift für das betrachtete System in dessen KEA-Berechnung ein [3, 9].⁴

Für das konkrete Vorgehen bei der Bestimmung der relevanten Energieaufwendungen bietet die VDI-Richtlinie zwei Methoden an, die im Grundsatz von allen anderen ausgewerteten Quellen kritiklos übernommen wurden: Die **Input-Output-Analyse** beruht auf der Auswertung nationaler Statistiken und eignet sich vorrangig für gesamtwirtschaftliche Analysen von Stoffgruppen. Sie ist daher Ausgangspunkt der Erstellung der oben genannten Datenbanken zur Bewertung des Inputs [3].

³ Mit Hilfe der Kriterien sollen Energieaufwendungen identifiziert werden, die lediglich einen marginalen Anteil am Gesamt-KEA haben. Um die Wirtschaftlichkeit der KEA-Berechnung selbst zu gewährleisten, werden diese Aufwendungen in den Folgeschritten nicht mehr berücksichtigt.

⁴ Die VDI-Richtlinie 4600 fordert bspw., für nachgenutzte Energieträger einen Wert mindestens in Höhe ihres Heizwertes anzusetzen [3]. Zur Diskussion verschiedener Ansätze zur Bemessung der energetischen Gutschrift vgl. [9].

Die zweite vorgeschlagene Methode ist die **Prozesskettenanalyse**. Ausgehend vom Endprodukt wird hierbei jeder Schritt der zur Herstellung, Nutzung bzw. Entsorgung eines Produkts notwendigen Prozesskette untersucht. Der erste (grobe) Schritt bezieht dabei typischerweise zunächst nur Baugruppen ein, deren Herstellung wiederum selbst analysiert werden muss. Die folgenden, immer detaillierter werdenden Analyseschritte bewegen sich entlang der Produktstruktur bis hin zu den an der Systemgrenze eingehenden Stoffen (Rohstoffe, Halbzeuge etc.) und Energien. Da die detaillierte Untersuchung der einzelnen Prozesse in der Praxis sehr aufwändig ist, wird die Kombination einer Makro- und einer Mikroanalyse vorgeschlagen. In der Makroanalyse werden die notwendigen Daten auf einem hohen Aggregationsgrad aufbereitet, bspw. können hier ganze Produktionslinien als Prozessschritte der Herstellung aufgefasst werden. Neben Messungen lassen sich auf dieser Analyseebene auch Vergleichsdaten und Erfahrungswerte heranziehen. Das Ziel der Makroanalyse ist es, Prozesse mit einem relevanten Beitrag zum Gesamt-KEA zu identifizieren. Durch eine Fokussierung auf diese Prozesse soll der Aufwand der anschließenden, wesentlich detaillierteren Mikroanalyse verringert werden. Der hier zu wählende Aggregationsgrad sollte möglichst gering sein, allerdings von der Verfügbarkeit entsprechender Daten bzw. dem Aufwand ihrer Erhebung sowie der angestrebten Aussagekraft abhängig gemacht werden. In einem abschließenden Schritt werden sogenannte „sensitive Positionen“ [3] (bspw. Halbzeuge mit unbekanntem KEA_H oder Hilfsstoffe) analysiert, um Fehler einzugrenzen und somit Aussagen zur Validität des ermittelten Gesamt-KEA treffen zu können [3, 5].

3 Methodenkritik

Im Folgenden werden die wichtigsten Kritikpunkte an der KEA-Berechnung nach VDI-Richtlinie 4600 aufgegriffen und diskutiert.

Beschränkte Datenbasis: Ein Hauptproblem der KEA-Berechnung stellt die Datengewinnung dar. Die Komplexität der betrachteten Systeme bedingt einen hohen Erhebungsaufwand. Zugleich ist die Aussagekraft der ermittelten Daten im Besonderen für späte Phasen des Produktlebenszyklus eher begrenzt. Während sich die Energieaufwendungen für die Herstellungsphase (KEA_H) durch die Auswertung betrieblicher Informationssysteme bzw. direkte Messungen relativ genau bestimmen lassen, muss für die Nutzungsphase eine Reihe von Annahmen getroffen werden (bspw. für einen PKW eine Gesamtfahrleistung und ein definiertes Lastprofil). Diese Annahmen basieren zumeist auf Durchschnitts- bzw. Erfahrungswerten, ihre Aussagekraft für den Einzelfall ist somit beschränkt [10]. Ein damit verbundenes Problem ist die Unterstellung linearer Verbrauchsverläufe. So weist bspw. Lambert auf den Umstand hin, dass allein die Komplexität innerbetrieblicher Materialkreisläufe schon zu nicht-linearen Abhängigkeiten zwischen (internem) Recyclinggrad und entsprechendem Energieaufwand führen kann [7]. Annahmen und

Daten zur Phase der Entsorgung eines Produkts und den damit verbundenen Energieaufwendungen (KEA_E) sind mit einer noch größeren Unsicherheit verbunden. Die Art und der jeweilige Aufwand der Entsorgungsprozesse sind aufgrund ihrer Komplexität nur schwer prognostizierbar. Die verschiedenen Produktbestandteile folgen sehr unterschiedlichen Entsorgungspfaden und haben verschiedene Zeithorizonte. Darüber hinaus werden typischerweise Abfallfraktionen aus einer Vielzahl von Bestandteilen diverser Produkte gebildet und gemeinsam entsorgt [10]. Die primärenergetische Bewertung von Energieaufwendungen künftiger Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsprozesse mittels bestehender Datenbanken wirft zusätzlich die Frage auf, inwieweit die auf heutigen Produktionsstrukturen basierenden Daten realistische zukunftsbezogene Berechnungen erlauben [10].

Allokation von „Gemeinenergiemengen“: Ein in der ausgewerteten Literatur weitgehend unbeachtetes Problem ist die Allokation von Energieaufwendungen, die für die Herstellung, Nutzung bzw. Entsorgung mehrerer Produkte gemeinsam anfallen. Derartige „Gemeinenergiemengen“⁵ sind bspw. Energieaufwendungen zur Errichtung, Heizung und Beleuchtung von Gebäuden. In einem typischen Mehrproduktunternehmen stellt sich die Frage, wie diese Aufwendungen auf einzelne Produktarten/-gruppen zu verrechnen sind. Da sie für alle erzeugten Produkte gemeinsam anfallen, lassen sie sich nicht über ein kausales Verrechnungsprinzip zuordnen. Ein simples Beispiel sind die Energieaufwendungen für die Hallenbeleuchtung. Sie werden allein durch die Tatsache verursacht, dass überhaupt produziert wird. Es existiert keine kausale Beziehung zwischen der produzierten Menge einer bestimmten Produktart und den angefallenen Gemeinenergiemengen. In der Praxis lässt sich das Problem teilweise durch die Bildung von Verrechnungsschlüsseln auf der Grundlage gegebener Produktionsprogramme lösen. Allerdings verringert dies die Aussagekraft der ermittelten Werte, da das Produktionsprogramm in der Realität, bspw. aufgrund schwankender Nachfrage, häufig variiert. Die VDI-Richtlinie empfiehlt für das ähnlich gelagerte Problem der Verrechnung von Energieaufwendungen auf Kuppelprodukte, den Einfluss derartiger Verrechnungsprinzipien auf das Gesamtergebnis zu untersuchen und ggf. durch eine Systemerweiterung zu verringern. In jedem Fall sollten, auch in Bezug auf die obigen Kritikpunkte, die getroffenen Annahmen nachvollziehbar dokumentiert werden, um die Transparenz der KEA-Berechnung zu erhöhen [3].

Integrierte Betrachtung von Stoff- und Energieströmen: Eine auf die Grundbegriffe des KEA bezogene Kritik äußern Fritsche et al. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, berücksichtigt die KEA-Berechnung neben der energetischen auch die stoffliche Verwendung von Energieträgern. In diesem Zusammenhang stellt sich die

⁵ Der Begriff wurde in Analogie zu den Gemeinkosten der Kostenrechnung gewählt. Diese umfassen die Kosten gemeinsam genutzter Ressourcen. Ihre Allokation auf einzelne Verrechnungsobjekte ist mit ähnlichen Problemen verbunden wie die entsprechender Energiemengen. Zum Begriff der Gemeinkosten und zu Verrechnungsprinzipien der Kostenrechnung vgl. bspw. [11].

Frage, was ein Energieträger im Sinne des KEA ist. Neben klassischen Brennstoffen mit einem Heiz- bzw. Brennwert werden hier auch bspw. Aluminium, Chlor oder Schwefel aufgrund ihrer Reaktionsenthalpien (frei werdende Energie bei chemischer Reaktion mit anderen Stoffen) formal als stofflich genutzte Energieträger in die KEA-Berechnung einbezogen [10]. Dieses Vorgehen ist methodisch unproblematisch, wenn, wie vorgesehen, beim Ausscheiden des stofflich genutzten Energieträgers eine Gutschrift für das System erfolgt. Fritsche et al. bezweifeln jedoch die praktische Umsetzbarkeit aufgrund der oben beschriebenen Unsicherheit der Daten über zukünftige Entsorgungsprozesse. Um diesem Problem zu begegnen und die Aussagekraft des KEA als energiebezogener Indikator zu steigern, schlagen sie daher vor, die stoffliche Nutzung von Energieträgern aus der KEA-Berechnung auszuklammern. Darüber hinaus erlaubt die klare Abgrenzung von Stoff- und Energieströmen nach ihrer Auffassung „die methodisch ‚saubere‘ Entkopplung der Entsorgungsfrage vom KEA“ [10]. Letzterem ist allerdings entgegenzuhalten, dass ein „Auslagern“ der Entsorgungsphase dem lebenszyklusorientierten Grundgedanken des KEA widerspricht und ggf. signifikante Energieaufwendungen aus der Betrachtung ausschließt.

Spezifika regenerativer Energieerzeugung: Ein häufig genannter Kritikpunkt an der VDI-Richtlinie betrifft deren Bewertungsansätze für regenerative Energieträger (vgl. bspw. [10, 12]). Zum einen führt das Vorgehen bei der Bestimmung des Bereitstellungsnutzungsgrads gemäß VDI-Richtlinie nach Fritsche et al. zu einer „einseitige[n] Diskriminierung der Regenerativen“ [10] (so wird bei Photovoltaikanlagen auf das Verhältnis zwischen Nettoenergieerzeugung und auf die Modulfläche eingestrahelter Solarenergie abgestellt [3], bei fossilen Energieträgern hingegen wird auf die Einbeziehung ungenutzter Ressourcen, bspw. in Form von Lagerverlusten⁶, verzichtet). Zum anderen unterstellt etwa die Aggregation aller Energieaufwendungen in einem KEA-Wert, dass alle Energieträger, unabhängig von ihrer Fähigkeit zur Regeneration, gleich zu behandeln sind. Aus umweltpolitischer Sicht sind jedoch regenerative Energieträger den nicht-regenerativen vorzuziehen bzw. können negative Umweltwirkungen allein durch die Substitution nicht-regenerativer gemindert werden. Darüber hinaus ist das Knappheitsproblem nicht-regenerativer Energieträger (Begrenzung der Gesamtmenge) ein anderes als dasjenige regenerativer (Begrenzung der pro Zeiteinheit verfügbaren Menge) [7, 10]. Um den unterschiedlichen Umweltwirkungen Rechnung zu tragen, wird eine Differenzierung des KEA nach Primärenergieträgern vorgeschlagen (Bild 2). Durch eine Kombination mit den ursprünglichen Differenzierungsansätzen der VDI-Richtlinie (Lebenszyklusphasen bzw. Art der Verwendung der eingesetzten Energieträger, vgl. Formel 3) ergeben sich weitere Möglichkeiten der Auswertung des KEA.

⁶ Bei der Förderung fossiler Energieträger verbleibt eine gewisse Restmenge in der Lagerstätte, da deren Extraktion technisch sehr aufwändig und damit unwirtschaftlich wäre. Dieser „Rest“ wird als Lagerverlust bezeichnet [10].

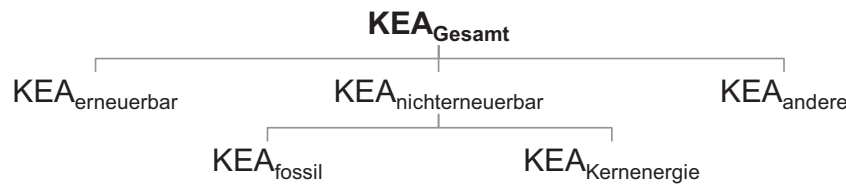


Bild 2: Differenzierung nach Primärenergieträgern (eigene Darstellung, in Anlehnung an [10])⁷

Aussagekraft des KEA in Bezug auf die ökologische Wirkung eines Produkts:

Der KEA wird in der Literatur trotz seiner Beschränkung auf Energieaufwendungen als geeignetes Instrument zur ersten Abschätzung der Umweltwirkungen eines Produkts angesehen (vgl. bspw. [2, 4, 12-14]). Während Nissen die Ableitung von Aussagen zur Umweltverträglichkeit von Produkten (insbesondere für energieintensive Produktionsbetriebe) nach Ökobilanzmaßstäben⁸ für möglich hält [2], wird dies in anderen Quellen explizit bestritten (vgl. bspw. [4, 12, 14]). Dabei wird argumentiert, dass zwischen dem Energieverbrauch und einer Reihe von ökobilanziellen Wirkungskategorien zwar häufig eine Korrelation besteht,⁹ diese jedoch nicht ungeprüft für alle Produkte und/oder deren Lebenszyklusphasen vorausgesetzt werden kann. Darüber hinaus findet sich für andere Wirkungskategorien, wie bspw. die Ökotoxizität oder den Flächenverbrauch, keine solche Korrelation, weshalb sie sich durch den KEA prinzipiell nicht abbilden lassen [4, 13]. Für eine exakte ökologische Bewertung von Produkten wird daher die Erstellung einer differenzierten Ökobilanz empfohlen, wobei der KEA als wichtiger Indikator in die Ökobilanzierung integriert werden sollte [12, 14]. Eine darüber hinausgehende Verwendung des KEA als „Kurzökobilanz“ [14], für Plausibilitätschecks oder zum Vergleich von Ökobilanzen untereinander erfordert eine zusätzliche Abschätzung des Einflusses der oben genannten, nicht mit dem Energieverbrauch korrelierenden Umweltwirkungen auf die Gesamtumweltwirkung des Produkts [4, 12, 14].

4 Implikationen des KEA für eniPROD

Der Fokus des Projekts eniPROD liegt auf der Untersuchung des Energieverbrauchs im Bereich der industriellen Produktion. Ziel ist es, Modelle und Methoden sowie konkrete technische Lösungen zu entwickeln, die eine nachhaltige Senkung des spezifischen Energiebedarfs ermöglichen. Die Analyse der Betrachtungsobjekte bzw. Demonstratoren der Teilprojekte von eniPROD erfordert die Festlegung

⁷ Die Kategorie KEA_{andere} erfasst die energetische Nachnutzung von Reststoffen, um deren umweltbezogenen Effekte explizit darstellen zu können [10].

⁸ Zu den Maßstäben der Bewertung von Umweltwirkungen im Rahmen der Ökobilanz vgl. [1].

⁹ Götze et al. nennen hier mit Bezug auf eine Standardliste des Umweltbundesamtes die Kategorien Treibhauseffekt, Sommersmog, terrestrische Eutrophierung, Versauerung, Humantoxizität, Lärm, Strahlung, Ressourcenbeanspruchung und Risiken [13].

spezifischer Systemgrenzen. Daraus resultiert – ähnlich wie bei den Problemstellungen, auf die das KEA-Konzept angewendet wird, – die Frage, wie die unterschiedlichen in die Systeme eingehenden bzw. aus diesen austretenden Stoffe und Energien aus energetischer Sicht bewertet werden können. Darüber hinaus müssen bei der Beurteilung von Systemalternativen auch deren Auswirkungen auf andere Lebenszyklusphasen (bspw. diejenigen veränderter Herstellungsprozesse auf die resultierenden Produkte) untersucht werden. So beeinflusst etwa die Auswahl der eingesetzten Materialien die Höhe der Energieaufwendungen vorgelagerter Bereitstellungsprozesse. Die aufgrund der verwendeten Materialien und Fertigungstechnologien variierenden Merkmale des erzeugten Produkts können wiederum einen wesentlichen Einfluss auf Energieverbräuche in der Phase der Nutzung ausüben. Um derartige lebenszyklusbezogene Effekte vergleichbar darstellen zu können, bedarf es einer entsprechenden **Energiemaßeinheit** (die der KEA oder eine daraus abgeleitete Größe darstellen könnte). Diese sollte darüber hinaus die Ergebnisse der energiebezogenen Analysen der Handlungsfelder des Projekts, die sich neben den angesprochenen Prozessen und Prozessketten auch auf neue Werkstoffe, Produktionssysteme, Fabriken, die Logistik sowie zu entwickelnde Produkte beziehen, mit ihren unterschiedlichen Abstraktionsgraden und Blickwinkeln auf die industrielle Produktion vergleichbar machen.

Wie in Abschnitt 2 gezeigt, erfüllt der KEA in seiner hier als Basiskonzept bezeichneten Variante gemäß VDI-Richtlinie die beschriebenen Anforderungen des Projekts an eine Energiemaßzahl bereits weitgehend. Ein – zumindest methodisches – Potenzial bietet das Konzept vor allem für den Umgang mit den projektspezifischen Systemgrenzen. Die Methode der primärenergetischen Bewertung des KEA unterstützt hier die Analyse und harmonisierte Bewertung von In- und Outputs des gewählten Systems. Sie erlaubt einerseits – mit Blick auf den Input – die Einbeziehung der „energetischen Vorgeschichten“ eingesetzter Stoffe und Energieträger, und somit die Abbildung der Effekte von Gestaltungsalternativen auf vorgelagerte Bereitstellungsprozesse. Darüber hinaus ermöglicht diese Rückführung auf Primärenergien den direkten Vergleich von (kumulierten) Energieaufwendungen unabhängig von den in den betrachteten Prozessen eingesetzten Energieformen. Andererseits können – mit Blick auf den Output – die energiebezogenen Konsequenzen unterschiedlicher Gestaltungsalternativen für nachgelagerte Nutzungs- und Entsorgungsprozesse über einen KEA bzw. konkreter über „energetische Gutschriften“ erfasst werden.

Mit Blick auf die Anwendung einer primärenergetischen Bewertung nach Vorbild des KEA stellt sich die Frage nach der Verfügbarkeit entsprechender Daten. Existierende Datenbanken bilden zumeist eine gegebene Kette von Bereitstellungsprozessen ab, die aber nicht notwendigerweise mit den im Projekt gewählten Betrachtungsgrenzen korrespondieren. So ist bspw. der Energieaufwand für die Bereitstellung eines Coils einer Stahlsorte hinterlegt, nicht aber der für zugeschnittene Ble-

che. Die entsprechenden, aus Sicht des Projekts zusätzlichen Bereitstellungsprozesse müssen daher gesondert analysiert und die notwendigen Energieaufwendungen berechnet bzw. geschätzt werden. Im besonderen Maße gilt dies für neuartige Werkstoffe. Ihre Herstellung basiert teils auf neuen Technologien, deren Energiebedarf bei einer Anwendung im industriellen Maßstab bisher unbekannt ist.

Das Basiskonzept des KEA gemäß VDI-Richtlinie propagiert die Integration der stofflichen Nutzung von Energieträgern in den KEA. Sie folgt damit der (zumindest impliziten) Zielstellung, den Einsatz knapper (fossiler) Energieträger zu senken. Demgegenüber zielt das Projekt eniPROD auf die Senkung des spezifischen Energiebedarfs industrieller Produktion ab. Diese Fokussierung auf die Ressource Energie sowie die mit der Bewertung stofflich genutzter Energieträger einhergehenden Probleme (vgl. Abschnitt 3) sprechen dafür, in der oben angesprochenen Energiemaßeinheit lediglich die energetische Nutzung von Energieträgern zu berücksichtigen und dem Basiskonzept des KEA in dieser Hinsicht nicht zu folgen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund eines gestiegenen Bewusstseins für die ökologischen Folgen wirtschaftlichen Handelns ist eine Reihe von Instrumenten und Konzepten entstanden, die die Wirkung von Produkten auf die natürliche Umwelt anhand von Indikatoren bewerten. Eines dieser Konzepte, der Kumulierte Energieaufwand, wurde im Rahmen des Beitrags näher untersucht. Als alleiniger Indikator wird hier die Summe aller Energieaufwendungen, die im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts entstehen, verwendet. Um die verschiedenen Energieformen bzw. -träger vergleichbar zu machen, werden sie in Primärenergieaufwendungen umgerechnet. Die kritische Würdigung des Konzepts hat gezeigt, dass spezifische methodische Schwächen sowie teils subjektive Annahmen und unsichere Daten die Aussagekraft des KEA in Bezug auf die ökologische Wirkung von Produkten einschränken. Die ausgewertete Literatur empfiehlt daher, den KEA als Indikator in die umfassendere Ökobilanz zu integrieren (vgl. Abschnitt 3).

Bezogen auf eniPROD bietet das KEA-Konzept das Potenzial, Schnittstellen der betrachteten Teilsysteme zu vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsketten abzubilden und Verbräuche unterschiedlicher Energieformen konsistent zu aggregieren. Darüber hinaus trägt eine solche Energiemaßzahl dazu bei, die Forschungsarbeiten und -ergebnisse innerhalb des Projekts miteinander verzahnen zu können. Die mögliche Ableitung von Aussagen zur Umweltwirkung der im Projekt eniPROD erarbeiteten Lösungen ist mit der oben erwähnten Integration des KEA in die Ökobilanz angesprochen. Der ausgeprägte Energiebezug legt aber eine eniPROD-spezifische Interpretation des KEA-Konzepts zur Definition einer projektweiten Energiemaßzahl nahe.

Weiterer, methodischer Forschungsbedarf liegt zum einen in der (projektspezifischen) Behebung der in Abschnitt 3 genannten Schwachstellen. Zum anderen sollte das KEA-Konzept (bzw. seine projektspezifische Ausgestaltungsvariante) in eine integrierte technisch-ökonomische Analyse einbezogen werden, um auch die monetären Effekte von zunächst vorrangig technologieorientierten Gestaltungsalternativen zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs der industriellen Produktion bewerten zu können. Dies würde zudem die Wirtschaftlichkeit zu einer Nebenbedingung (wenn nicht sogar zu einer gleichrangigen Zielstellung) erheben und damit zu einer noch stärkeren Praxisorientierung der entwickelten Lösungen beitragen.

Acknowledgment

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, November 2009
- [2] Nissen, Nils F.: Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme, Diss., TU Berlin, 2001
- [3] VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand: Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, Juni 1997
- [4] Eberle, R.: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau, Diss., TU Berlin, 2000
- [5] Schaefer, H.: Zielstellung und grundlegende Prinzipien der KEA-Richtlinie. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), VDI-Berichte 1218, Kumulierter Energieaufwand, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 1-9
- [6] Fritsche, U.; Wiegmann, K.: Kumulierter Primärenergie-Aufwand (KEA) biogener Öle, Kurzstudie im Auftrag des IWO, Darmstadt, 2008, URL: www.oeko.de/service/bio/dateien/kea_biogene_oele_iwo_2008.pdf [15.12.2010]

- [7] Lambert, A.: *Flexible Methode zur Bestimmung des Energiebedarfs in Prozessketten*. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), VDI-Berichte 1218, *Kumulierter Energieaufwand*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 33-43
- [8] Datenbank des GEMIS-Projekts: URL: www.probas.umweltbundesamt.de [15.12.2010]
- [9] Ebersperger, R.: *Beispiele für Zurechnungsverfahren des Energieaufwands bei Entsorgung und Recycling von Produkten*. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), VDI-Berichte 1218, *Kumulierter Energieaufwand*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 11-31
- [10] Fritsche, U.; Jenseit, W.; Hochfeld, Ch.: *Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwands (KEA)*, Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 104 01, 1999, URL: www.oeko.de/service/kea/dateien/kea-methodik.pdf [16.09.2010]
- [11] Götze, U.: *Kostenrechnung und Kostenmanagement*, 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin et al., 2010
- [12] Jungbluth, N.; Frischknecht, R.: *Cumulative energy demand*. In: Hirschler, R.; Weidema, B. (Hrsg.), *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, Data v2.2*, 2010, URL: www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation-v2.2.pdf [07.12.2010], S. 33-40
- [13] Götze, R.; Rippen, G.; Wiesert, P.; Fehrenbach, H.: *Medienübergreifende Bewertung von Umweltbelastungen durch bestimmte industrielle Tätigkeiten*, Bericht im Rahmen des Forschungsvorhabens *Umweltplanung/Ökologie des Umweltbundesamtes*, 2001, URL: www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2453.pdf [28.07.2010]
- [14] Hochfeld, C.; Jenseit, W.: *Allokation in Ökobilanzen und bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA)*, Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 104 01 123, 1998, URL: www.oeko.de/service/kea/dateien/kea-allokation.pdf [28.07.2010]