

# Frühzeitige energetische Produktbeeinflussung durch Nutzung von Kausalverkettungen im Automobilbau (*Causal chains for influencing the energy demands of automotive industry products in early stages of their development*)

Pape, D.<sup>1</sup>; Mantwill, F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Helmut-Schmidt-Universität, Professur Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung*

## **Abstract**

Das Themenfeld der Energieeffizienz steht seit der Energiewende in Deutschland mehr als zuvor im Mittelpunkt der öffentlichen Aufmerksamkeit. Durch die Kundenforderungen nach neuen Produkten, stellt das produzierende Gewerbe einen großen Energieverbraucher dar. Im Produktentstehungsprozess legt die frühe Phase der Entwicklung bereits einen großen Teil des später anfallenden Energiebedarfs bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung fest. Durch das Life-Cycle-Assessment wird ein Fundament zur ökologischen Bewertung geschaffen, welches unter anderem die Methode des Kumulierten Energieaufwands nutzt, um eine Energiebewertung zu ermöglichen. Nach Erstellung dieser Bewertung werden energieintensive Konstruktionsentscheidungen nachträglich durch kostenintensive Iterationsschleifen verbessert oder finden im nächsten Produktrelease Berücksichtigung. Eine sofortige Berücksichtigung des Energiebedarfs während einer frühen Phase stellt oft eine bessere Option dar und sollte direkt durch den Entscheidungsträger nach dem Prinzip „First-Time-Right“ erfolgen. Der vorliegende Beitrag beschreibt, wie mit Hilfe von Kausalverkettungen die energetischen Auswirkungen von Entscheidungen auf nachgelagerte Prozesse dargestellt werden können, so dass Transparenz bereits nach der ersten Konzeptentscheidung erzeugt werden kann.

*The topics related to energy efficiency are in the center of the German public's attention – mainly driven by the governmental policy for a transition of energy sourc-*

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>

ing and use. In this regard, in particular, the manufacturing industry plays an important role. Firstly, it is one of the largest energy users and, secondly, it significantly affects the energy demand of its products during the whole life cycle by the corresponding product design. Commonly, life cycle assessment (LCA) is an approach for the ecological evaluation of existing products and processes. Among others, LCA uses the method of the cumulated energy demand for energy-related evaluations. Based on this, energy-intensive design decisions are improved subsequently by means of cost-intensive iteration loops or will be taken into account in the next product-release. However, an in time consideration of the later energy demand in the early stages of product development appears to be the better option and should be implemented by the corresponding decision-makers in accordance with the principle "first-time-right". This paper describes the use of causal chains for illustrating energy-related impacts of single design decisions on downstream processes. With this method the transparency regarding the life cycle energy demand can be increased already after the first concept decision.

**Keywords:**

Kausalketten, Produktdesign, Energieeffizienz  
*causal chains, product design, energy efficiency*

## 1 Hintergrund und Vorgehen

Im Dezember 2008 hat sich die Europäische Union auf ein Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie geeinigt, welches Zielvorgaben bis 2020 enthält. Demnach sollen, bezogen auf das Jahr 2005, die Treibhausgasemissionen um 20% verringert und der Anteil an erneuerbaren Energien sowie die Energieeffizienz um jeweils 20% erhöht werden [1]. Der Forschungsbereich der Energieeffizienz erreicht durch langfristige Prognosen zum Anstieg der Energiekosten auch die Unternehmen. Die Rohstoffverknappung und der damit zunehmend größer werdende Aufwand für die Förderung fossiler Energien, wie auch die höheren Kosten zur Erzeugung regenerativer Energie, sorgen auch bei gleichbleibendem Energieverbrauch für einen Anstieg der Kosten [2]. Jedes Produkt verursacht in seinem Produktleben von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung einen Energieverbrauch. Für die ganzheitliche Erfassung und vergleichende Beurteilung dieses Verbrauchs eignet sich der Kumulierte Energieaufwand (KEA), welcher ein Teilgebiet des Life-Cycle-Assessment (LCA) darstellt. Soll der Energieverbrauch in frühen Phasen der Produktentwicklung abgeschätzt werden, kann auf Grund der bis zu diesem Zeitpunkt nur begrenzt verfügbaren produkt- und prozessspezifischen Daten keine vollständige Energiebilanz erstellt werden. In diesem zeitlichen Stadium werden jedoch bis zu 80% aller Umweltauswirkungen festgelegt [3]. Eine tiefere Analyse der vorlie-

genden Daten würde eine frühzeitige energetische Produktbeeinflussung begünstigen, wobei ein Arbeitsprozess benötigt wird, der erste Abschätzungen auf einfache Art und Weise erlaubt und dabei dennoch richtungssichere Ergebnisse liefert [4].

Um den Energieverbrauch zu verringern, wurden unterschiedlichste Projekte innerhalb der Industrie angestoßen die das Ziel haben, die bestehenden Prozesse in der Produktion energetisch zu verbessern. Bei diesem Vorgehen werden jedoch nur die Auswirkungen in Form des direkten Energiebedarfs verbessert, aber nicht die Ursache, das Produkt selbst. Mit der Methode des Kumulierten Energieaufwandes kann in einem ersten Schritt analysiert werden, welche Prozesse in der Produktion den größten Teil der Energie verbrauchen und wie diese energieintensiven Prozesse in einem frühen Zeitraum der Produktentstehung, unter Berücksichtigung aller zusätzlichen Anforderungen, in energieärmere substituiert werden können. Damit eine Aussage über Verbesserungspotentiale möglich ist, ist eine Darstellung des Energiebedarfs notwendig. Es wird für diesen Beitrag zu Grunde gelegt, dass getroffene Entscheidungen in einem frühen Zeitpunkt eine nachgelagerte Entscheidungsmöglichkeit beeinflussen oder sogar unmöglich machen. Diese Ursache-Wirkungsverknüpfung wird als „Kausalverkettung“ bezeichnet. Um diese Verknüpfung nutzen zu können, muss eine Validierung stattfinden, welche energetische Kausalverkettung entsteht, wenn eine Entscheidung in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozess getroffen wird. Ist diese Kausalkette bekannt, kann frühzeitig ermittelt werden, in welchem Bereich die Streuung des prognostizierten Energieverbrauchs liegen wird.

Um das Vorgehen bei dieser Methode darzulegen, werden im folgenden Kapitel Begriffe und Methoden erläutert, die das Fundament bilden und den Stand der Technik repräsentieren. Im darauffolgenden Teil werden die bestehenden Lösungen kritisch bewertet und durch ein Konzept erweitert. Zum Abschluss folgen eine kritische Betrachtung des Konzepts sowie der Ausblick auf weitere mögliche Forschungsrichtungen.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Life-Cycle-Assessment**

Das gestiegene Bewusstsein über die Bedeutung des Umweltschutzes und möglicher Umweltwirkungen, die mit der Produktion und Anwendung von Produkten im Zusammenhang stehen, hat das Interesse an der Entwicklung von Methoden erhöht, die zum besseren Verständnis und zur Berücksichtigung der Umweltwirkungen dienen. Eine der dafür entwickelten Methoden ist die Ökobilanzierung, welche im Englischen unter dem Namen Life-Cycle Assessment bekannt ist. LCA kann zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten führen und Möglichkeiten

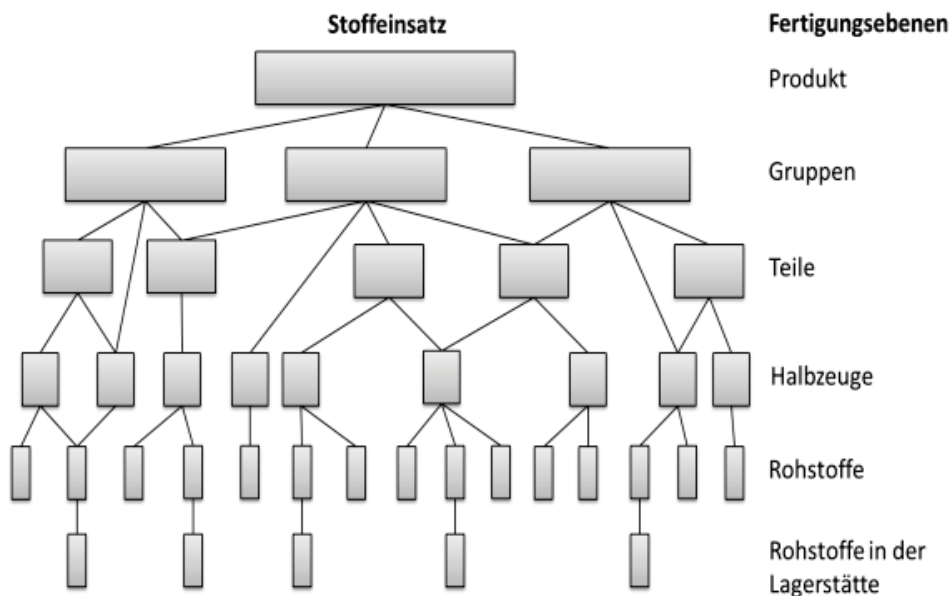
zur Umweltverbesserung aufzeigen. LCA hilft bei der Auswahl von relevanten Indikatoren der Umwelteigenschaften, einschließlich der zugehörigen Messverfahren, und beim Marketing [5]. Nach DIN EN ISO 14040 werden zunächst die zu erreichenden Ziele festgesetzt und entsprechende Systemgrenzen gezogen. Innerhalb dieser Grenzen wird eine Sachbilanz durchgeführt und aus dem Ergebnis die Wirkung abgeschätzt.

## 2.2 Kumulierter Energieaufwand

Im Zuge der Technikbewertung und Technikfolgenabschätzung wird es zunehmend üblich, dass Produkte und Dienstleistungen unter Aspekten wie Aufwand und Ressourcenbelastung quantifiziert und analysiert werden. Die Methode des KEA kann genutzt werden, um energetische Daten in einem einheitlichen Grundrahmen verfügbar- und vergleichbar zu machen. Hierbei ist der KEA unter anderem bei dem LCA ein wichtiger Kennwert für eine ökologische Bewertung des jeweils betrachteten Systems [6]. Der KEA ermöglicht die energetische Beurteilung und den Vergleich von Produkten und Dienstleistungen und bildet eine wichtige Basis, um die Prioritäten von Energieeinsparpotenzialen in einem komplexen Zusammenhang zwischen Konstruktion, Herstellung, Nutzung und Entsorgung aufzuzeigen.

### 2.2.1 Die Prozesskettenanalyse

Durch die Prozesskettenanalyse wird eine Möglichkeit geschaffen, den Energiebedarf skalierbar bis in die unterste Ebene, die der Rohstoffe aufzuschlüsseln. Bild 1 zeigt solch ein Schema für die Herstellung.



**Bild 1:** Schema einer Prozesskettenanalyse für die Herstellung [6]

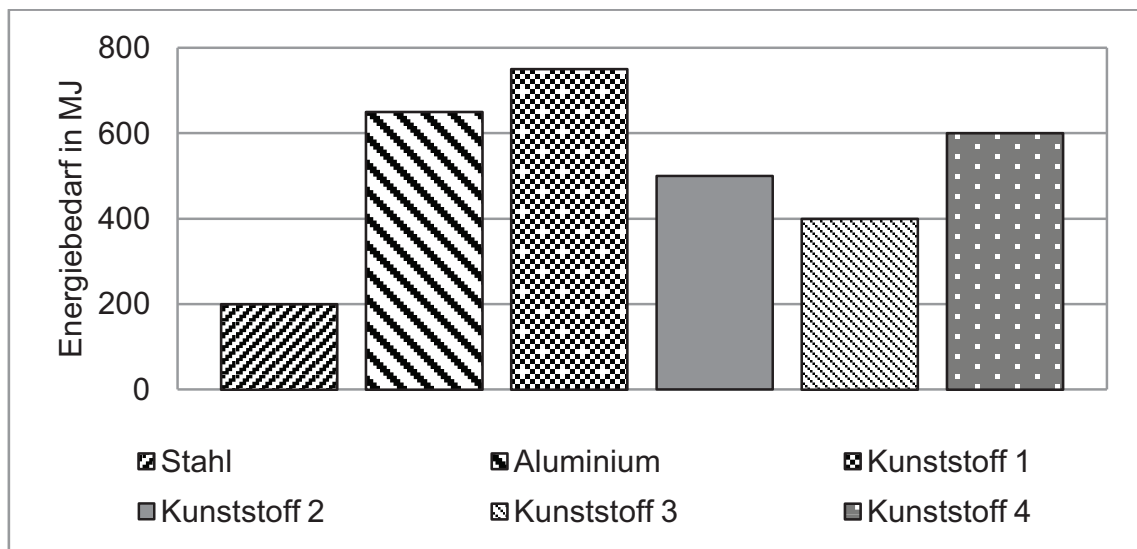
In der Prozesskettenanalyse werden die Stufen des Veredelungsprozess aufgeschlüsselt. Die einzelnen Energieverbräuche der Prozesskette bilden dabei den  $KEA_H$ . Der gesamte KEA setzt sich wiederum aus der dem Energiebedarf der Herstellung (H), Nutzung (N) und Entsorgung (E) zusammen.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (1)$$

Um das Ziel einer frühzeitigen energetischen Produktbeeinflussung zu realisieren, ist zunächst der  $KEA_H$  zu betrachten. Mit diesem Wert ist es möglich, eine Aussage über den Energiebedarf der Produktionsphase zu erhalten. Durch Betrachtung des  $KEA_N$  ergibt sich die Möglichkeit, zusätzliche energetische Aufwendungen während der Herstellung zu rechtfertigen, die den Energieverbrauch in der Nutzungsphase begünstigen, so dass eine energetische Amortisierung stattfinden kann. Durch den  $KEA_E$  wird die Energie berücksichtigt, die beim Ausschleusen des Produktes aus dem Nutzungskreislauf entsteht bzw. rückgewonnen werden kann. Die nachfolgenden Unterkapitel erläutern die verschiedenen Phasen des entstehenden Energiebedarfs bei der Herstellung des Produktes.

## 2.2.2 Rohstoff- und Halbzeugherstellung

Bereits vor der Nutzung des Materials bzw. der Halbzeuge muss Energie aufgebracht werden, um Rohstoffe und Recyclingmaterial zu einem neuen Produkt wie beispielweise eine Automobilkarosse aufzubereiten. Die hierfür benötigte Energie, die in den monetären Kosten integriert sind, trägt ein Material bereits vor der endgültigen Fertigstellung in sich. Da sich die Kernkompetenzen der Automobilindustrie heutzutage weitestgehend auf das Umformen und Trennen im Presswerk, das Fügen im Karosseriebau, das Beschichten in der Lackiererei und ein weiteres Fügen in der Montage beziehen, bereitet die Verhüttungsindustrie die Erstellung von Material und Halbzeugen vor. Werden diese zum Automobilhersteller geliefert, enthalten die Produkte bereits einen Anteil des  $KEA_H$ , welcher Berücksichtigung finden muss. Findet diese Betrachtung keine Anwendung, kann ein Produktionsstandort ggf. durch Fremdvergabe des Fertigungsprozess scheinbar energieeffizienter werden, obwohl die Energie außerhalb der Systemgrenzen verbraucht wird. Je nach Materialart ist der KEA zunächst höher oder niedriger. Bild 2 zeigt den Energiebedarf bei der Herstellung eines Kotflügels mittels zwei Metallen und vier Kunststoffen. Durch die Wahl des Werkstoffes kann der Energiegehalt eines Produktes bereits vor der Produktionsplanung im hohen Maße beeinflusst werden.



**Bild 2:** Unterschiedlicher Energiebedarf der Materialien eines Kotflügels nach [7]

### 2.2.3 Produktherstellung

Durch die in der Entwicklung getroffenen Entscheidungen werden die nachfolgenden Prozesse maßgeblich beeinflusst. Daher sollten bei einer ökologischen Werkstoffauswahl auch die Herstellungsprozesse in die Entscheidung einfließen. Bild 3 zeigt hierzu einen schematischen Veredlungsprozess einer Automobilkarosserie bis zum Beschichten.

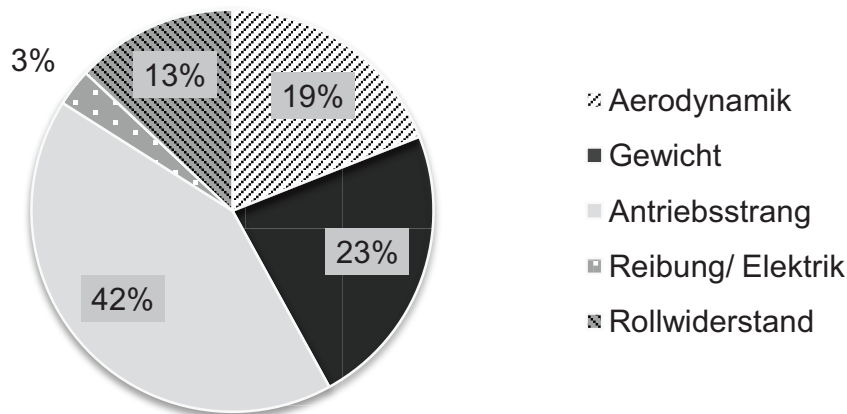


**Bild 3:** Schematischer Veredlungsprozess in der Automobilindustrie nach [8]

Der eigentlich Umform- und Trennprozess zum endgültigen Erreichen der Form geschieht beim Automobilhersteller innerhalb des Presswerks. Mit Hilfe unterschiedlichster Fügeprozesse werden einzelne Bauteile im Karosseriebau miteinander verbunden. Hierbei handelt es sich um Verfahren, bei denen z. B. bei einem Schweißverfahren hohe Temperaturen erzeugt werden, um stoffschlüssige Verbindungen zu erzeugen. Weitere Veredlungsprozesse wie das Beschichten mit verschiedenen Lackschichten folgen.

## 2.2.4 Produktnutzung

Abhängig von der Lebensdauer eines Automobils entsteht in der Nutzungsphase ein großer Energiebedarf. Durch das folgende Bild 4 wird deutlich, dass der Energiebedarf während der Nutzung von mehreren Faktoren abhängt.



**Bild 4:** Faktoren zur Abhängigkeit des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase nach [9]

Neben dem Antriebsstrang und der Aerodynamik stellt das Gewicht des Fahrzeugs eine der Hauptgrößen dar, die sich stark auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase auswirkt. Eine Reduzierung des Gewichts wird angestrebt, da der dadurch sinkende Verbrauch während der Nutzungsphase einen Wettbewerbsvorteil darstellt.

## 2.2.5 Produktentsorgung

Bereits aufbereitetes Material benötigt beim Recycling oftmals weniger Energie als eine komplette Neuproduktion. Durch eine Beeinflussung der Recyclingfähigkeit können während der Entsorgung nachfolgende Prozessketten verkürzt und somit effizienter gestaltet werden. Die Wahl des Produktwerkstoffs hat hierbei großen Einfluss auf den Recyclingprozess, da nicht jeder Werkstoff gleich gut wiederverwertet werden kann. Auch die Wahl einer geeigneten Füge-technik kann das Zerlegen eines Produktes mit weniger Energieeinsatz begünstigen. Durch eine gute Recyclingfähigkeit entsteht ein Energiebonus für die Wiederaufbereitung, welche auch in der Bilanzierung berücksichtigt werden muss. Unter anderem bei Kunststoffen ist die Recyclingfähigkeit oft nur eingeschränkt möglich, so dass in dieser Phase weniger Energie rückgeführt werden kann. Soll ein Produkt recyclinggerecht entwickelt werden, schränkt dies bereits die Materialauswahl ein. Die Materialauswahl hat wiederum Einfluss auf die potentiell durchführbare Füge-technik, welche bei

einer energieeffizienten Produktion mit ganzheitlicher Sicht auf den Produktlebenszyklus berücksichtigt werden muss.

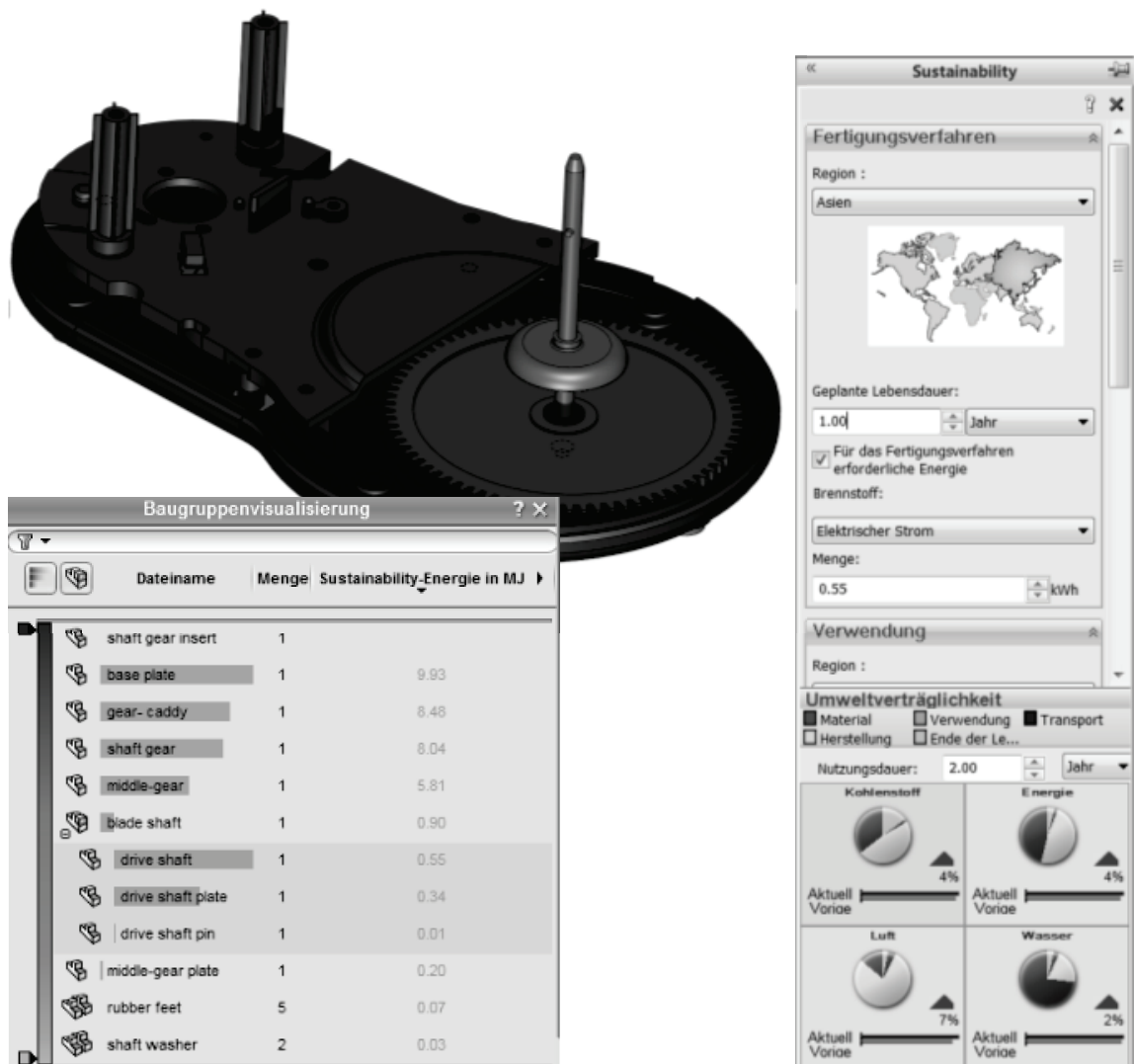
### 2.3 Bereits bestehende Softwarelösungen

Auf dem Markt existiert bereits Software, mit denen eine Ökobilanzierung durchgeführt werden kann. Durch ein begleitendes Projekt der frühzeitigen energetischen Produktbeeinflussung in Kooperation mit einem großen Automobilisten ist bekannt, dass für ganzheitliche Ökobilanzierungen in großen Unternehmen ganze Abteilungen notwendig sind. Ergebnisse dieser Bilanzierungen sind unter anderen prognostizierten CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche durch die Nutzung des Produktes entstehen werden. Die Produktionsphase selbst findet erst seit kürzerer Zeit Berücksichtigung, wobei oft die genauen CO<sub>2</sub>-Emissionen für den jeweils verwendeten Herstellungsprozess fehlen. Handlungspotenzial innerhalb der Entwicklung wird hierbei kaum berücksichtigt.

Um den Entwickler für das Thema der Energieeffizienz zu sensibilisieren, kann eine definierte Schnittstelle dazu beitragen, wichtige Informationen anwenderorientiert zu übergeben. Eine professionelle Bilanzierungssoftware muss von speziell hierfür geschulten Mitarbeitern bedient werden. Eine Einarbeitung in diese Systeme gestaltet sich im Tagesgeschäft des Entwicklers häufig zu zeitaufwändig und würde durch die geringe Priorisierung der Anforderung der Energieeffizienz abgelehnt werden. Die genutzte Bilanzierungssoftware spricht oft nicht die „Sprache des Entwicklers“. Ein Grund für die geringe Priorisierung sind die derzeit noch relativ niedrigen Energiekosten, die noch wenige Kosteneinsparpotenziale bieten. Eine restriktive Berücksichtigung der Anforderung Energie hätte zur Folge, dass der Entwickler durch Termindruck und Zeitmangel nur die quantitativen Ziele zur Vollständigkeit erarbeitet. Ziel müsste jedoch sein, bei allen sich auf die Energieeffizienz auswirkenden Entscheidungen offen und innovativ zu reagieren. Es wäre daher zielführend die Software für eine Ökobilanzierung in der Sprache des Entwicklers zu überführen, wobei die Komplexität eingeschränkt ist, aber eine hinreichend sichere Energieprognose erzielt und genutzt werden kann.

Um das Thema der Ökobilanzierung weiter in die Arbeitsumgebung des Konstrukteurs zu tragen, gibt es Lösungen, die innerhalb eines Konstruktionssystems Bewertungen von eingesetzten Werkstoffen erlauben. In Bild 5 wird am Beispiel der Firma Dassault Systèmes im Konstruktionssystem Solid Works eine Lösung gezeigt, die auch Inventor von Autodesk in ähnlicher Weise für eine ökologische Materialauswahl bietet.





**Bild 5:** Arbeitsumgebung Sustainability von Solid Works der Firma Dassault Systemes

In der gezeigten Arbeitsumgebung von Solid Works sowie im nicht gezeigten Eco Materials Adviser kann ein Bauteil hinsichtlich des verwendeten Werkstoffes bewertet und eine erste Abschätzung des entstehenden Energieverbrauchs getroffen werden. Ein Vergleich zwischen den Werkstoffen kann durch die Größen Kohlenstoff, Energie, Luft und Wasser stattfinden. Hierbei besteht eine Visualisierung der Verbesserung/ Verschlechterung darin, dass diese unterschiedlich eingefärbt werden. Für eine Auswahl von Alternativen ist es möglich, am Anfang der Untersuchung Werkstoffeigenschaften einzugeben, so dass an Hand von Werkstoffkennwerten eine Vorauswahl der potentiellen Werkstoffe durchgeführt werden kann. Diese Auswahl wird in Bild 6 dargestellt.

Eigenschaft	Bedin...	Wert	Einheiten
Materialklasse	=	-beliebig-	
E-Modul	~	1.93e+011	N/m <sup>2</sup>
Poissonzahl	-belie	0.27	
Wärmeausdehnungskoeffizient	-belie	1.6e-005	K
Massedichte	~	8000	kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit	-belie	16.3	W/(m*K)
Spezifische Wärmekapazität	-belie	500	J/(kg*K)
Zugfestigkeit	-belie	5.8e+008	N/m <sup>2</sup>
Zugspannung	-belie	1.723689e+008	N/m <sup>2</sup>
Hardening factor (0.0-1.0; 0.0=isotropic; 1.0=kinematic)	-belie	0.85	

Ähnliches Material suchen										
Materialien	Materialklasse	E-Modul	Poissonzahl	Wärmeausdehnungskoeffizient	Massedichte	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Wärmekapazität	Zugfestigkeit	Zugspannung	Hardening ..
<input type="checkbox"/>	1.8550 (34CrAlNi7-10)	DBN Stahl (Nitrierfähig legiert)	1.9e+0...	0.28	1.1e-005	7800	14	440	9e+008	6.8e+008
<input type="checkbox"/>	1.4301 (X5CrNi18-10)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4305 (X8CrNiS18-9)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4306 (X2CrNi19-11)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4307 (X2CrNi18-9)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4310 (X10CrNi18-8)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	5e+008	1.95e+008
<input type="checkbox"/>	1.4313 (X3CrNiMo13-4)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7700	14	440	7e+008	5.2e+008
<input type="checkbox"/>	1.4401 (X5CrNiMo17-12-2)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	8000	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4404 (X2CrNiMo17-12-2)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	8000	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4439 (X2CrNiMo17-13-5)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	8000	14	440	5.8e+008	2.7e+008
<input type="checkbox"/>	1.4460 (X3CrNiMo27-5-2)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7800	14	440	7.7e+008	6.1e+008
<input type="checkbox"/>	1.4462 (X2CrNiMo22-5-3)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7800	14	440	8.5e+008	6.5e+008
<input type="checkbox"/>	1.4541 (X6CrNiTi18-10)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	7900	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2)	DBN Stahl (Edelstahl)	2e+011	0.28	1.1e-005	8000	14	440	6e+008	4e+008
<input type="checkbox"/>	1.2210 (115CrV3)	DBN Stahl (Kaltarbeitsstahl)	2e+011	0.29	1.1e-005	7870	14	440	6.7e+008	3.7e+008

Umweltverträglichkeit				
CO <sub>2</sub> -Emissionen	Energie	Luft	Wasser	Produktionsprozess
				Gestanztes/geformtes Blech
Ausgewählt	Ausgewählt	Ausgewählt	Ausgewählt	Alzeptieren Bearbeiten

Bild 6: Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionswerkstoffen im Sustainability Modul

Neben der Dichte und der Zugfestigkeit gibt es weitere Größen, die für einen Vergleich genutzt werden können. Es fehlt bei der Bewertung auf Bauteilebene jedoch die Berücksichtigung der eingebrachten Energie der betriebsinternen Logistik, wie auch der Energieverbrauch durch Umform-, Trenn- sowie Fügeverfahren und Handhabungsprozesse. Eine Bewertung der Baugruppe ist ebenfalls nicht vollständig möglich, da die Betrachtung der Prozessenergien zur Verbindung der Bauteile nicht erfolgt. Eine Erweiterung um diese Energieverbräuche wäre ein erster Schritt zu einer genaueren frühzeitigen Energiebedarfsprognose.

### 3 Konzept für eine frühzeitige energetische Produktbeeinflussung

Durch bereits bestehende Lösungen wurde gezeigt, dass das Thema der Ressourcenschonung weiter in die Arbeitswelt des Entwicklers einziehen kann. Für eine genauere Prognose müssen jedoch die bereits bestehenden Lösungen erweitert werden. Die Anforderung an eine Reduzierung des Energieverbrauchs kann für den Entwickler somit zu einer richtungsweisenden, quantitativen Größe werden.

### 3.1 Objektorientierte Visualisierung des Energiebedarfs

Durch die während des Veredelungsprozesses aufgebrauchte Energie steigt der KEA der Bauteile sowie der daraus entstehenden Baugruppen an. Wird der Kumulierte Energieaufwand für alle verwendeten Prozesse erhoben, entsteht eine Aussagefähigkeit über die Energieeffizienz im Vergleich zu anderen Produkten. Dies ist wichtig um Handlungsbedarf zu ermitteln und Verbesserungspotentiale zu erschließen. Diesen Überlegungen zu Grunde liegend wurde ein Konzept erarbeitet, dass es ermöglicht, eine bauteilbezogene Visualisierung zu erarbeiten und somit Transparenz zu erzeugen. Um eine Vergleichbarkeit der Bauteile/ Baugruppen untereinander zu erhalten, ist eine gemeinsame Basis erforderlich. Hierfür kann die spezifische Energie pro Gewicht genutzt werden. So ist es möglich, verschiedene Werkstoffe miteinander zu vergleichen und eine Aussage über den Energieverbrauch zu treffen. Auch der absolute Energiebedarf eines Bauteils ist bei diesem Vergleich wichtig um verschiedene Konstruktionen mit unterschiedlichen Werkstoffen untereinander vergleichen zu können. Dem Werkzeug zur Erstellung dieser „Energietlandkarte der Entwicklung“ liegt hierbei eine Datenbasis zu Grunde, in der alle erforderlichen Energiedaten für die verwendeten Werkstoffe hinterlegt sind. In einem weiteren Schritt kann die Sicht auf die einzelnen Bauteile durch eine Veränderung der Skalierung in die nächst höheren Baugruppen verändert werden. Bei der daraus resultierenden Betrachtung der Baugruppe, kann eine Sicht auf den Energiebedarf der Fügetechnik stattfinden.

Um einen Dialog zwischen Mensch und Maschine aufzubauen, wurde eine Programmoberfläche erstellt, welche den Anteil der Werkstoffenergie autark vom Konstruktionssystem pro Bauteil darstellt. Die Bauteile sind untereinander vergleichbar und können auf der Farbskala gemäß ihrem Energiegehalt eingeteilt werden. Dabei kann zwischen spezifischer Bauteilenergie (Werkstoff) und gesamter Bauteilenergie (Masse, Volumen) differenziert werden. Bild 7 zeigt die Programmoberfläche zur Transparenzerzeugung am Beispiel einer Baugruppe einer simplifizierten Vordertür eines PKWs. Von links nach rechts zu sehen ist der Strukturbaum, der auch im Konstruktionssystem zu finden ist. Hierbei stellt der oberste Knoten die Baugruppe dar und alle weiteren Einträge repräsentieren einzelne Bauteile, welche lediglich Bauteilenergie beinhalten. Rechts daneben werden die verwendeten Fügetechniken aufgeschlüsselt, welche zum fertigen der Baugruppe genutzt wurden. Hierbei findet eine Aufsummierung der Energiedaten der einzelnen Fügstellen statt und ergeben einen Gesamtenergiebedarf für die Fügetechnik. Links zu sehen ist eine Abbildung der Baugruppe, welche gemäß dem Energiegehalt, analog zu den am Markt erhältlichen Systemen, unterschiedlich eingefärbt wurde. Basis dieser Untersuchung ist eine Energiedatenbank, in der alle benötigten Energieverbrauchsdaten kategorisch abgelegt sind. Das gesamte Funktionsschema des Energietools ist in Bild 8 visualisiert.

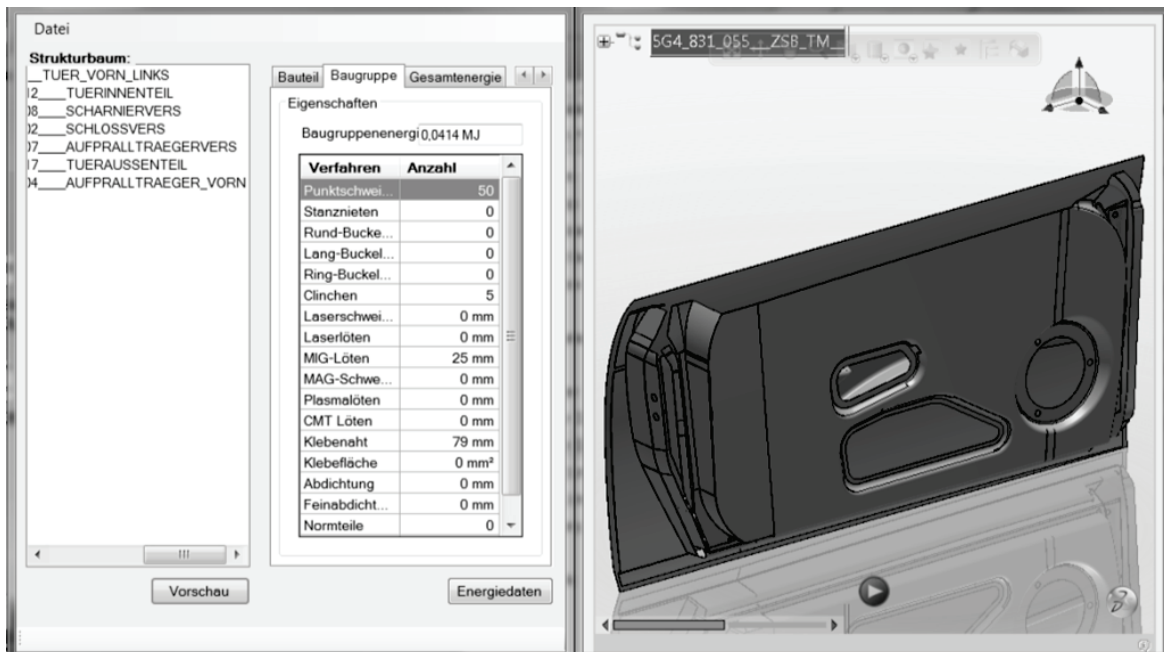


Bild 7: Vergleich der Werkstoffenergie bei einer Vordertür

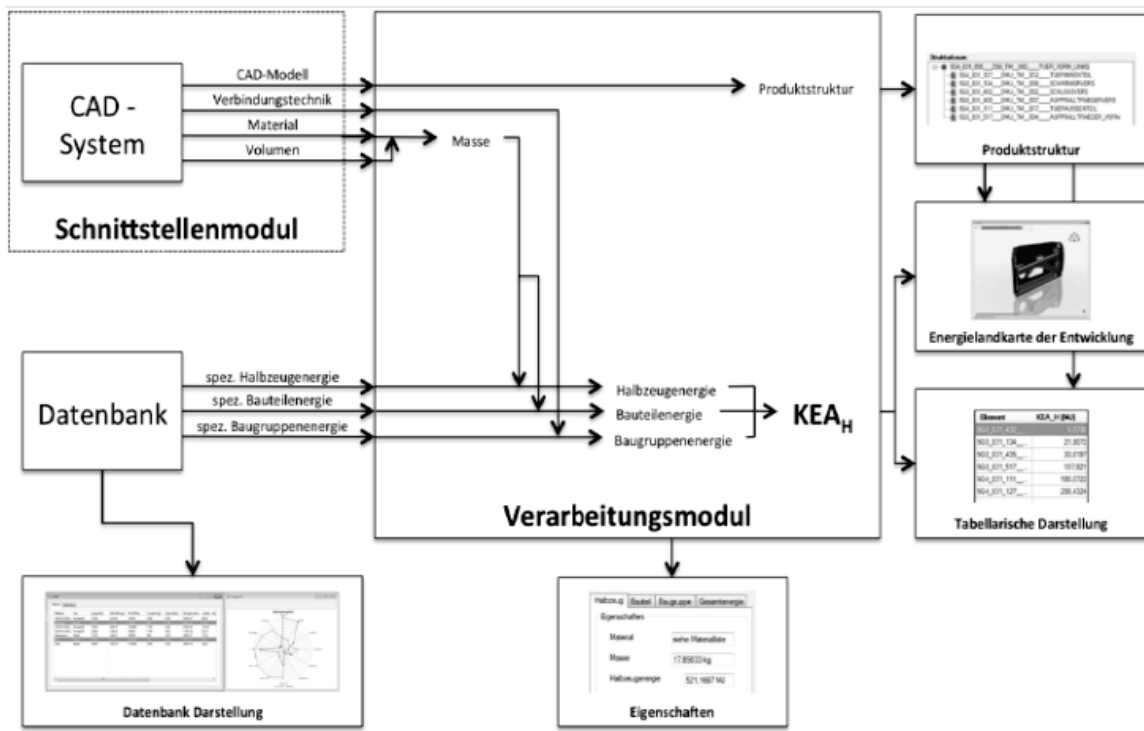


Bild 8: Funktionsschema des Energietools

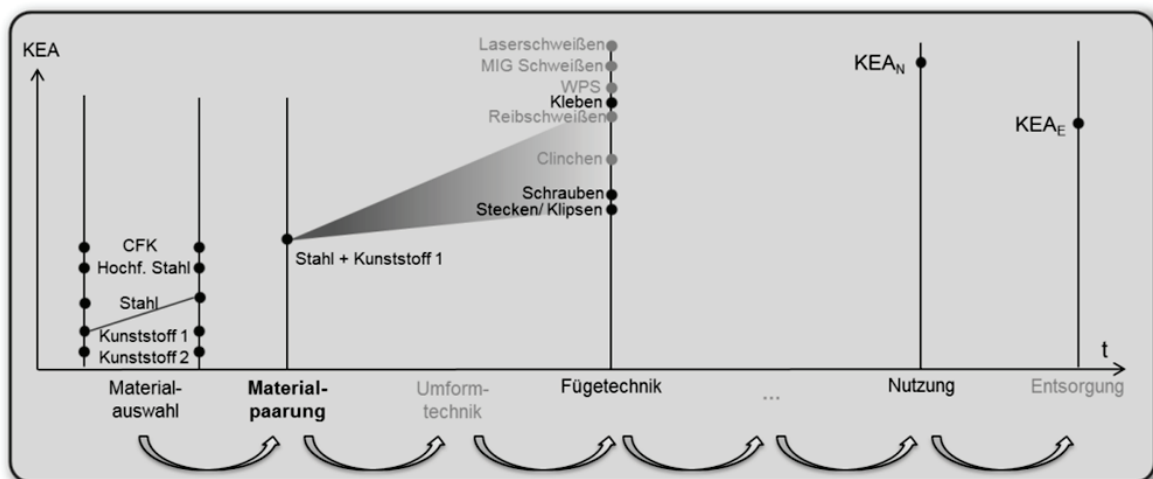
Das CAD- System wird genutzt um aus der Geometrieinformation Material und Volumen auszulesen. Hierbei ist auch die Fügetechnik im CAD abgelegt. Ist das

pflegen der Füge-technik im CAD zu aufwendig, können die Informationen auch in einer gesonderten Datenbank abgelegt werden. Wichtig ist hierbei, dass eine Datenbasis überhaupt existent ist. Die Geometrie- und Fügeinformationen werden mit den Datenbankinformationen zu den einzelnen Werkstoffen verbunden und ergeben den gesamten  $KEA_H$  der wiederum grafisch aufbereitet die „Energielandkarte der Entwicklung“ sowie eine quantitative tabellarische Darstellung ergibt.

Für eine frühe Energieprognose ist es zudem wichtig zu wissen, welche energetischen Zusammenhänge zwischen den Konstruktionsentscheidungen und Produktionsprozessen bestehen, worauf im nächsten Unterkapitel eingegangen wird.

### 3.2 Energetische Kausalverkettungen

Grundlage einer Betrachtung von Kausalverkettungen ist die Tatsache, dass Entscheidungen aus einem vorgelagerten Prozess Auswirkungen auf nachgelagerte Prozesse haben. Bereits bei der Auswahl einer Werkstoffpaarung in der Konzeptphase kann eine Aussage über die noch verbleibenden potentiellen Füge-techniken getroffen und somit ein Streubereich der aufzuwendenden Energie prognostiziert werden. Ziel ist es dabei, unter Berücksichtigung hierarchisch übergeordneter Anforderungen, wie z.B. Gewicht, Kosten und Design, das energetisch günstigste Fügeverfahren auszuwählen. Bild 9 zeigt hierzu exemplarisch eine Aufschlüsselung zweier Werkstoffkombinationen und deren prognostizierten Energieverbrauch.



**Bild 9:** Mögliche Visualisierung des prognostizierten KEA

Zunächst werden die Werkstoffe der einzelnen Bauteile bestimmt und deren Masse. Dabei kann eine erste Beurteilung auf den Daten des Vorgängermodells getroffen werden. Ist die Werkstoffentscheidung getroffen, kann, wie hier exemplarisch gezeigt, aufbauend auf die Wahl der Werkstoffpaarung eine Entscheidung über das energetisch günstigste und technologisch noch durchführbare Fügeverfahren getroffen werden. Technologisch nicht durchführbare Fügeverfahren werden wie in

diesem Beispiel ausgegraut und stellen keine wählbare Option mehr dar. So entfallen bei einer Kunststoff- Stahl Paarung unter anderem die meisten Schweißprozesse. Ein Ergebnis der Untersuchung ist eine Kennzeichnung der optimal möglichen Werkstoffpaarung hinsichtlich Herstellung, Nutzung sowie Entsorgung. Zu überprüfen bleibt, welche hierarchisch übergeordneten Anforderungen zusätzlich an die Konstruktion gestellt werden, die eine weitere Einschränkung der Lösungsmöglichkeiten zur Folge haben. In einem weiteren Schritt werden das Gewicht der Einzelteile sowie das Gewicht der evtl. genutzten Fügeelemente auf die Nutzungsphase gerechnet, so dass ein Vergleich stattfinden kann. Die Methode ist hierbei beliebig erweiterbar und sollte für alle Stationen erfolgen, in denen ein Energiebedarf entsteht.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Der größte Energieverbrauch findet innerhalb der Automobilindustrie in der Produktion statt. Das Produkt beeinflusst den Produktionsprozess und die hierzu benötigten Betriebsmittel im hohen Maße. Den Prozess energieeffizient zu gestalten, ist ein erster wichtiger Schritt, dem derzeit verstärkt nachgegangen wird. Ein weiterer Schritt ist eine Substitution der vorhandenen Prozesse durch energieärmere. Hierbei ist eine frühzeitige Betrachtung des Produktes und dessen Auswirkung auf den Energieverbrauch eine entscheidende Maßnahme, da das Produkt einen Stellhebel für Produktionsprozesse darstellt. Es gibt bereits verschiedene Ansätze im Bereich der Ökologiebetrachtung, Produkte umweltgerecht zu gestalten, ein Einzug in die Arbeitswelt des Konstrukteurs gelingt bisher jedoch nur langsam. Anbieter verschiedener Konstruktionssysteme versuchen, mittels entsprechender Arbeitsumgebungen die Thematik der Ressourcenschonung näher an den Konstrukteur heran zu tragen. Hierbei liegt der Fokus derzeit lediglich auf dem Energiegehalt des Grundwerkstoffs. Eine Erweiterung der Betrachtung auf Prozesse wie z. B. das Umformen wie auch das Fügen, Beschichten, Montieren und die Logistik wäre ein weiterer Schritt, welcher eine genauere Energieprognose erlaubt. Für eine vollständige Ökobilanzierung wurde in der Vergangenheit eine Bewertung nach der Konstruktionsphase von fachkundigen Mitarbeitern vorgenommen. Ein Vorschlag zur Ressourcenschonung wird entweder mit viel Aufwand durch eine kostenintensive Iterationsschleife in das Produkt eingepflegt oder findet erst im nächsten Produktrelease Berücksichtigung. Ein effektiverer Weg kann beschritten werden, wenn nach dem Prinzip „First-Time-Right“ das Thema der Ressourcenschonung bereits während der frühen Konzeptphase berücksichtigt wird. Hierbei muss die Ökobilanz in die „Sprache des Entwicklers“ überführt werden, so dass er zeitnah verschiedene Lösungsprinzipien bewerten und dadurch eine Entscheidung treffen kann. Eine Unterstützung kann dann durch das Darstellen von Kausalverkettungen erfolgen. Dem Konstrukteur sollten hierfür die späteren energetischen Auswirkungen der

Entscheidung auf Basis der bereits verfügbaren Daten unmittelbar vor Augen geführt und quantitativ bewertet werden. Dieser kann bei einer Existenz von Entscheidungsfreiräumen unter Berücksichtigung hierarchisch übergeordneter Anforderungen die energetisch günstigere Lösung wählen. Wird der Energiegehalt der Bauteile/ Baugruppen dokumentiert, kann über die Zeit eine Entwicklung der benötigten Energie analysiert werden. Ein Demonstrator zur Visualisierung des Energiegehaltes wurde in einem laufenden Forschungsprojekt konzipiert und auf Umsetzbarkeit positiv überprüft. Die Umsetzung einer produktiven Version des Tools muss erfolgen, um die Methodik im Tagesgeschäft der Mitarbeiter und somit die Akzeptanz zu testen. Folglich kann eine Bewertung des Konzeptes vorgenommen werden.

## Literaturangaben

- [1] Europäisches Parlament, "20-20-20 bis 2020": EP debattiert Klimaschutzpaket, URL: [www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080122IPR19355+0+DOC+XML+V0//DE](http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080122IPR19355+0+DOC+XML+V0//DE) [12.03.2012]
- [2] Behler, C.: Effizienzgewinne durch Energie- und Lastspitzen- Management, IT&Production Zeitschrift für erfolgreiche Produktion, 2012, S. 26
- [3] IPP Produktdesign: Projekt Umweltfreundliche Produktentwicklung, 2012, URL: <http://klima.hamburg.de/das-projekt/> [18.06.2012].
- [4] Atik, A.: Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte, Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [5] DIN EN ISO 14040, 2009, Deutsches Institut für Normung, Umweltmanagement-Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen
- [6] VDI 4600, 2007, Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definition, Berechnungsmethoden
- [7] Philipp J. A.; Eyerer P.: Ökobilanzen für Stahlprodukte Sachstand und Perspektiven, Stahl und Eisen, 1994, 07.11: S. 73
- [8] DIN 8580, 2003, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung
- [9] Warsen, J.; Krinke, S.: Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2012, 07.08: S. 560-565