

Paul Martin

**Eine Methode zur Objektivierung der Zielgröße
Energieeffizienz für die Produktprofildefinition
im Kontext des Design to Energy Efficiency**

A Method for Objectivization of Energy Efficiency
as a Design Objective for the Definition of Product
Profiles in Design to Energy Efficiency

Band 81

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Forschungsberichte

Paul Martin

**Eine Methode zur Objektivierung der Zielgröße
Energieeffizienz für die Produktprofildefinition
im Kontext des Design to Energy Efficiency**

A Method for Objectivization of Energy Efficiency as
a Design Objective for the Definition of Product
Profiles in Design to Energy Efficiency

Band 81

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2014
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Paul Martin

ISSN 1615-8113

Eine Methode zur Objektivierung der Zielgröße Energieeffizienz für die Produktprofildefinition im Kontext des Design to Energy Efficiency

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Paul Martin
aus Freiburg i.Br.

Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 2014
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christian Weber

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe¹ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibräumen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

¹ Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 81

Die modernen Produkte des Maschinen- und Fahrzeugbaus müssen sich den Herausforderungen und Megatrends in unserer Gesellschaft stellen. Eine zentrale Herausforderung ist dabei sicherlich der Zwang zu einer größeren Nachhaltigkeit und zu einer Reduzierung der Umweltbelastungen. Auch wenn dieser Aspekt oft auf der Ebene der Produktdefinition noch nicht die entscheidende Rolle spielt, ist ohne Zweifel für eine nachhaltige Wirtschaft, auch aus globaler Sicht, hier ein Umdenken notwendig und eine Reaktion der modernen Produktentwicklung in der Industrie zwingend erforderlich. Um diesen Aspekt der Ressourcenschonung in den Zielsystemen neuer Produkte berücksichtigen zu können, müssen entsprechende Zielgrößen definiert und individuell für jeden Produktentwicklungsprozess ermittelt, festgelegt und in die Produktprofile integriert werden. Eine eindeutig in diese Richtung wirksame Zielsetzung ist die Steigerung der Energieeffizienz, d. h. die Reduzierung des, für eine geplante Produktnutzung notwendigen, Energieaufwands. Die Energieeffizienz moderner Produkte steht zunehmend im Fokus, sowohl im Konsumentenbereich, wie z. B. bei Fahrzeugen und elektrischen Geräten des täglichen Bedarfs, als auch im Investitionsgüterbereich, d. h. in der Ausstattung unserer Fabriken und Unternehmen. Es gibt verschiedene Forschungsarbeiten und vorgeschlagene Methoden, um die Energieeffizienz bereits in der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Ein Ansatz mit einer Methode, die bereits in der frühen Produktdefinitionsphase bei der Erstellung der initialen Zielsysteme und Produktprofile wirksam wird, ist in einer ganzheitlichen Form bisher noch nicht vorhanden.

An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Paul Martin an. Er definiert in seiner Arbeit die Zielgröße Energieeffizienz für die Produktprofildefinition in einer für die Praxis geeigneten Weise und erarbeitet eine Methode und ein Verfahren zur produktindividuellen Bestimmung dieser Zielgröße für die Produktentwicklungspraxis. Er leistet damit sowohl wissenschaftlich als auch praxisorientiert einen wesentlichen Beitrag für die moderne Produktentwicklungsmethodik.

Dezember, 2014

Albert Albers

Kurzfassung

Ein differenziertes und projektspezifisches Verständnis der Energieeffizienz als Zielgröße ist eine wesentliche Voraussetzung für ihre zielführende Verwendung bei der Definition von Produktprofilen. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die eine systematische Identifikation und Abgrenzung der wesentlichen Zielaspekte ausgehend von dem initialen Ziel generischer Energieeffizienz sowie die Ableitung entsprechender Kenngrößen unterstützt. Sie dient somit der Entwicklung eines objektivierten Zielverständnisses der Energieeffizienz und deren Operationalisierung.

Im Kontext des *Design to Energy Efficiency* existiert eine Vielzahl an Methoden, die eine Steigerung der Energieeffizienz zum Ziel haben. Die Untersuchung des Stands der Forschung sowie eine empirische Studie im industriepraktischen Entwicklungsumfeld zeigen jedoch, dass bei diesen Methoden und der praktischen Produktentwicklung die Heterogenität der projektspezifischen Bedeutung und Relevanz dieses Ziels nicht ausreichend berücksichtigt wird. Zusätzlich stellt die quantitative und aussagekräftige Formulierung der Energieeffizienzziele eine weitere Herausforderung in der Entwicklungspraxis dar.

Daher wird eine Methode zur *Systematisierung* des Vorgehens bei der Definition von Energieeffizienzzielen entwickelt. Diese basiert auf projektspezifischen Angaben zu bestehenden Anforderungen und Randbedingungen und unterstützt die Beurteilung der Relevanz und des damit verknüpften Wertschöpfungspotenzials der Energieeffizienz als initiale Zielgröße. Zusätzlich wird die Relevanzverteilung bzgl. einzelner dem Ziel zugrunde liegender Motive sowie Hinweise und Empfehlungen für eine zielgerichtete Handhabung der Energieeffizienz abgeleitet. Darauf aufbauend wird im Rahmen der *Operationalisierung* ein Ansatz zur Erstellung von Energieeffizienz-Kenngrößen entwickelt, deren spezifischer Einsatzzweck die Quantifizierung von Energieeffizienzzielen für die Produktnutzungsphase ist.

Die entwickelten Ansätze werden in einem Vorgehens- und einem Referenzmodell zusammengefasst sowie zum Teil in softwarebasierten Werkzeugen umgesetzt. Darauf basierend erfolgt eine abschließende Validierung des Vorgehens in fünf Studien im Rahmen unterschiedlicher Entwicklungsprojekte. Dabei wird die beabsichtigte Unterstützung grundsätzlich verifiziert. Eine eingeschränkte Reproduzierbarkeit der Relevanzbeurteilungen bestätigt jedoch auch die Notwendigkeit einer unternehmensspezifischen Anpassung des hierfür vorgesehenen adaptiven Teils der Methode.

Mit dem entwickelten Ansatz werden dem Produktentwickler eine Methode und ein entsprechendes Werkzeug für die Aktivitäten der Profildefinition zur Verfügung gestellt, welche die Objektivierung der Energieeffizienz als Zielgröße unterstützen.

abstract

A differentiated and project-specific understanding of energy efficiency as a design objective is an essential prerequisite for its target-oriented usage during the definition of product profiles. The thesis on hand presents a method that supports a systematic identification of the most important objective's aspects based on the initial objective of generic energy efficiency as well as the deriving of corresponding indicators. Hence, the method supports the development of an objectivized target understanding of energy efficiency and its operationalization.

There are plenty of methods that aim to increase energy efficiency. Examination of the relevant state of the art as well as an empirical study in engineering development practice however, show that the heterogeneity and project-specific meaning and relevance of this objective are not sufficiently considered. The quantitative and meaningful formulation of energy efficiency objectives has additional challenging implications on the engineering practice.

Therefore, a method is developed that supports a *systematization* of the definition of development objectives. It bases on project-specific information about existing requirements and boundary conditions and supports the assessment of the relevance and linked value creation potential of energy efficiency as an initial design objective. Additionally the relevance distribution regarding different underlying motives as well as references and recommendations are deduced. Based on this, an approach for the generation of suitable energy efficiency indicators within the *operationalization* is developed. These indicators are specifically created for quantification of energy efficiency targets for the product use phase.

The developed approaches are summarized in a process model and a reference model as well as partially implemented in software tools. Based on this, the developed proceeding is validated by means of five studies in different development projects. These studies verify the intended support for the designer. A limited reproducibility of the relevance assessments however also confirms the necessity of company-specific adaption of the correspondingly designed part of the method.

Within this thesis a method and a corresponding software tool are developed for the activities of product profile definition in order to support an objectivization of energy efficiency as a design objective

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die konstruktiven Diskussionen sowie insbesondere für die mir stets gewährten Gestaltungsfreiräume und das entgegengebrachte Vertrauen.

Für die Übernahme des Korreferats und die damit verbundene Unterstützung möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Weber sehr herzlich danken.

Mein Dank gilt außerdem allen Mitarbeitern des Instituts, die durch kollegiale und unkomplizierte Zusammenarbeit meine Motivation und die Entstehung der Arbeit unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei meine Kollegen Anne Ruckpaul, Björn Ebel und Christian Sander, die mich mit unzähligen Diskussionen und Anregungen über den gesamten Entstehungsprozess der Arbeit begleitet haben.

Besonders herzlich möchte ich meiner Familie danken. Meinen Eltern und Geschwistern danke ich dafür, dass sie mir meinen Weg ermöglicht und mich auf diesem stets unterstützt haben. Für die Geduld, die liebevolle Unterstützung und den aufbauenden Ausgleich danke ich meiner geliebten Frau Franziska sowie unseren Kindern Inga und Johan.

Karlsruhe, im Dezember 2014

Paul Martin

„...it is much more important to choose the ‘right’ objectives than the ‘right’ system.
To choose the wrong objective is to solve the wrong problem; to choose the wrong
system is merely to choose an unoptimized system.”

Arthur D. Hall (1925 – 2006)

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	4
2.1	Der Produktentstehungsprozess	4
2.1.1	ZHO Modell	7
2.1.2	Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)	9
2.1.3	Wesentliche Produktentstehungsaktivitäten im Design to Energy Efficiency	12
2.1.4	Zwischenfazit	15
2.2	Ziele und Anforderungen	16
2.2.1	Ziel- und Anforderungsbegriff	16
2.2.2	Entwicklung von Zielsystemen	18
2.2.3	Design for X und Design to X	24
2.2.4	Zwischenfazit	25
2.3	Energieeffizienz	25
2.3.1	Begriff und Bedeutung	25
2.3.2	Energetischer Aufwand	28
2.3.3	Nutzenbegriff und Nutzenbewertung	32
2.3.4	Zwischenfazit	39
2.4	Design to Energy Efficiency	39
2.4.1	Eindimensional motivierte Methoden	41
2.4.2	Generische Methoden	44
2.4.3	Bewertung von Relevanz und Potenzial der Energieeffizienz	49
2.4.4	Zwischenfazit	51
2.5	Kenngrößen zur Beschreibung der Energieeffizienz	52
2.5.1	Anforderungen an Energieeffizienz-Kennzahlen	52
2.5.2	Wesentliche Einflüsse auf Kennzahlen der Energieeffizienz	54
2.5.3	Überblick ausgewählter Energieeffizienz-Kennzahlen	56
2.5.4	Zwischenfazit	61
3	Motivation und Zielsetzung	62
3.1	Motivation	62
3.2	Zielsetzung	64
3.3	Forschungsfragen	65
4	Forschungsvorgehen	67
5	Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße	69
5.1	Vorgehen	69
5.2	Hypothesen	71
5.3	Schriftliche Befragung	73
5.4	Ergebnisse und Interpretation	76

6	Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße	88
6.1	Zu berücksichtigende Aspekte für die Entwicklung von Energieeffizienzzielen.....	91
6.1.1	Identifikation geeigneter Relevanzkriterien.....	92
6.1.2	Identifikation der zugrunde liegenden Motivation.....	93
6.2	Systematische Bewertung der Relevanz.....	101
6.2.1	Gewichtung der Motive	103
6.2.2	Bewertung der Ausprägung einzelner Motive	103
6.2.3	Bewertung der wechselseitigen Einflüsse	108
6.2.4	Einfluss von Relevanz und Potenzial auf das Wertschöpfungspotenzial	111
6.3	Ableitung von Empfehlungen	114
6.4	Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit anderen Zielen	115
7	Operationalisierung der Energieeffizienz als Zielgröße	118
7.1	Referenzzyklen	120
7.2	Beschreibung des Nutzens	121
7.2.1	Auswahl der Merkmale zur Nutzenquantifizierung.....	122
7.2.2	Gewichtung, Bewertung und Aggregation der Nutzenmerkmale.....	124
7.3	Beschreibung des Energieaufwands	128
7.4	Bildung des Utility-based Energy Efficiency Indicators (UBEEI)	129
7.5	Konkrete Zieldefinition.....	131
8	Vorgehensmodell und Referenzmodell	134
8.1	Vorgehensmodell.....	134
8.2	Referenzmodell.....	138
9	Werkzeugumsetzung und Validierung	142
9.1	Validierende Studien.....	150
9.1.1	Studie „Energieeffiziente Hochstromsteckverbinder“	151
9.1.2	Studie „Elektropneumatisches Schlagwerk eines Akku-Bohrhammers“.....	157
9.1.3	Studie „Winkelbohrkopf und Akku-Bohrhammer“.....	161
9.1.4	Studie „Elektrofahrzeug im Kontext Regional Eco Mobility 2030“	168
9.2	Ergebnisse und Reflexion	171
10	Zusammenfassung und Ausblick	174
10.1	Zusammenfassung	174
10.2	Ausblick	175
11	Literaturverzeichnis	177
12	Anhang	189

Formelzeichen

a	m/s ²	Beschleunigung
b	-	Bereitstellungsnutzungsgrad
c	m/s	Geschwindigkeit
D	m	Durchmesser
E_{Sys}	J	Energieinhalt im offenen System
EE	-	Energieeffizienz
Ee	Wh/fE ^{*)}	Endenergieaufwand
ε_{set}	-	Energieeffizienz im Ausgangszustand
$\varepsilon_{\text{current}}$	-	Energieeffizienz im Beobachtungszustand
F_B	N	Beätigungskraft
g	-	Gewichtungsfaktor
h	J/kg	Spezifische Enthalpie
I_{max}	A	Maximale Stromstärke
l	m	Länge
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
NEV	Wh/fE	Nichtenergetischer Aufwand
NM	-	Nutzenmerkmal
$OpBzgM$		Operationales Bezugsmerkmal
P_V	W	Verlustleistung
Q	J	Wärme
s	J/(K kg)	Spezifische Entropie
S	J/K	Entropie
SEI	Wh/fE	Stoffgebundener Energieinhalt
S_{irr}	J/k	Entropieanteil aus irreversiblen Prozessen
t	s	Zeit
W	J	Arbeit
z	m	Höhe über Bezugsniveau
$\#_S$	-	Anzahl Betätigungszyklen

^{*)} Diese Energiegrößen werden auf die funktionale Einheit fE bezogen, worunter das jeweils betrachtete Produkt, dessen Masse, Volumen, Energie usw. oder die Dienstleistung verstanden wird.

1 Einleitung

Methodisches und technologisches Innovationsvermögen sind für Industrieunternehmen wie für industrielle Volkswirtschaften grundlegende Voraussetzung für Erfolg im globalisierten Wettbewerb. Die Berücksichtigung von sozioökonomischen Anforderungen bezüglich der produktbezogenen Umweltauswirkungen und insbesondere von Fragen der Energieeffizienz ist aus heutigen Produktentstehungsprozessen nicht mehr wegzudenken. Ein Grund hierfür sind die bestehenden und sich zukünftig weiter verschärfenden politischen und gesetzlichen Vorgaben. Dabei nimmt die Komplexität der Aufgabenstellungen in der Produktentwicklung stetig zu, während sich die Unternehmen unter wachsendem Konkurrenzdruck bei kürzer werdenden Produktlebenszyklen in einem dynamischen Wettbewerb bei der Entwicklung neuer, innovativer Produkte befinden. Daher müssen Methoden, die die Produktentstehung unter diesen Randbedingungen unterstützen sollen, sowohl die Effektivität und Qualität der Produkte verbessern, als auch einen effektiven und effizienten Produktentstehungsprozess ermöglichen.

Der effiziente Einsatz von Energie wird im gesamten gesellschaftlichen Kontext sowohl zunehmend sensibler wahrgenommen, als auch tatsächlich höher bewertet.² Das Zusammenwirken dieser beider Tatsachen hat für die Produktentwicklung zweierlei zur Folge: Zum einen bemühen sich die Hersteller von energieverbrauchenden³ Produkten und sogar Hersteller von Produkten, bei welchen kein unmittelbarer Energieverbrauch ersichtlich ist, die Energieeffizienz ihrer Produkte bei vermeintlich unverminderter Effektivität deutlich herauszustellen. Zum anderen wachsen die tatsächlichen Anforderungen unterschiedlichen Ursprungs an die Produktentwicklung bezüglich der Zielgröße Energieeffizienz. Dabei entwickelt sich die Energieeffizienz in diesem technologischen und gesellschaftlichen Kontext von einem Lösungsansatz zu einer immer häufiger aufgeführten Zielgröße. Formulierung und Kommunikation der entsprechenden Ziele und Anforderungen liegen jedoch in der Regel in einer sehr undifferenzierten Form vor.⁴ Wie bei jeder Zielgröße in der Produktentwicklung ist eine möglichst präzise Definition und Kommunikation des Ziels Voraussetzung für die erfolgreiche Zielerfüllung. Eine einheitliche und reproduzierbare Berücksichtigung dieser Elemente fällt insbesondere für

² Vgl. Albers; Martin et al. 2014, S.1

³ Oder „energieverbrauchsrelevanten“ nach 2010/30/EU (2010)

⁴ Vgl. Kapitel 5 „Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße“

Energieeffizienzziele jedoch häufig unzureichend aus, da eindeutige Definitionen und damit ein einheitliches Verständnis nicht ohne Weiteres verfügbar sind, eine angemessene Quantifizierung unter anderem durch die fehlenden einheitlichen Definitionsmerkmale nahezu unmöglich ist und da eine eindeutige Kommunikation sich infolgedessen umso schwieriger gestaltet. Die Entwicklung eines einheitlichen und differenzierten Zielverständnisses ist demnach die Grundlage für eine angemessene Formulierung für das Ermöglichen einer Zielerreichungsüberprüfung sowie für eine entsprechende Kommunikation des eigentlichen Ziels.

Auch ALBERS sieht in der möglichst frühen Berücksichtigung und Unterstützung einer differenzierten Betrachtung von Energieeffizienzzielen eine Notwendigkeit, da „mit dem Profil und der Definition von Energieeffizienzzielen weitestgehend auch die dadurch verursachten Kosten“⁵ festgelegt werden. Diese wiederum müssen in einem angemessenen Verhältnis zur projektspezifischen Relevanz des Ziels stehen.

Unbeachtet der generischen Eigenschaft des Begriffs der Energieeffizienz und der damit verbundenen Heterogenität des Marktes für energieeffiziente Produkte, wird Letzterem ein immenses Wachstum zugeschrieben, wobei das Marktvolumen mit ca. 150 Milliarden Euro bereits eine erhebliche Größe darstellt.⁶ Die präventive Berücksichtigung der Energieeffizienz und anderer umweltrelevanter Aspekte, bereits während der Produktentwicklung, wird zunehmend als ein Wettbewerbsfaktor angesehen, mit dessen Hilfe Marktanteile langfristig gesichert werden können.⁷ Dabei gelten Energieeffizienzsteigerungen als zentraler Differenzierungsfaktor bei den Kunden.⁸

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Objektivierung der Energieeffizienz als Zielgröße leisten und so deren differenzierte und somit zielführende Verwendung in der Produktentwicklung unterstützen. Dies soll mithilfe eines systematischen Vorgehens erfolgen, welches neben der Beurteilung von projektspezifischer Relevanz und Potenzial der Energieeffizienz bereits in den Aktivitäten der Profilfindung, auch die Formulierung geeigneter Zielgrößen beinhaltet.

Die Arbeit gliedert sich in zehn Kapitel, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. In Kapitel 2 erfolgen eine Klärung der wissenschaftlichen Grundlagen sowie eine Vorstellung des für diese Arbeit relevanten Stands der Forschung. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 die Motivation abgeleitet sowie eine konkrete Zielsetzung formuliert.

⁵ Vgl. Albers, 2013c

⁶ Vgl. Rose 2014

⁷ Vgl. Kraushofer; Semmler 2003

⁸ Vgl. Gehrke, 2011

In Kapitel 4 wird die Zielsetzung in Forschungsfragen umgesetzt und ein geeignetes Forschungsvorgehen vorgestellt.

Kapitel 5 beschreibt eine empirische Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße im industriepraktischen Entwicklungsumfeld sowie die Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse. Auf Grundlage der im Rahmen der empirischen Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse bezüglich bestehender Bedarfe, wird in Kapitel 6 ein Ansatz zur systematischen und differenzierten Berücksichtigung der Energieeffizienz in der Produktentstehung entwickelt. In Kapitel 7 wird daran anknüpfend ein Ansatz zur Operationalisierung der Energieeffizienz als Zielgröße in Form geeigneter Indikatoren entwickelt. Diese beiden Ansätze werden in Kapitel 8 zu einem durchgängigen Vorgehensmodell zusammengeführt und es wird ein entsprechender Referenzprozess vorgeschlagen. Das entwickelte methodische Vorgehen wird in Kapitel 9 im Rahmen von fünf Studien an Problemstellungen aus der praktischen Produktentwicklung validiert.

Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 10 zusammengefasst und ein Ausblick zu weiteren Forschungsaktivitäten auf dem behandelten Forschungsthema gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen der Arbeit vorgestellt sowie der für diese Arbeit maßgebliche Stand der Forschung dargestellt und diskutiert. Basierend auf dem Stand der Forschung wird in Zwischenfazit der Handlungsbedarf abgeleitet, der im weiteren Verlauf der Arbeit die Zielsetzung und den entwickelten Ansatz begründet.

Die Betrachtung des Produktentstehungsprozesses bildet die Grundlage der weiteren Arbeit. Eine wesentliche und für den weiteren Prozess entscheidende Herausforderung zu Beginn des Produktentstehungsprozesses besteht grundsätzlich in der Entwicklung und Handhabung von Zielen und Anforderungen.

Für die Entwicklung von wettbewerbsfähigen Produkten wird dem Ziel Energieeffizienz eine zunehmend größere Rolle zugesprochen. Eine grundlegende Betrachtung des Begriffs und unterschiedlicher Definitionen ist daher notwendig, bevor ein Überblick zu den relevanten Ansätzen des Design to Energy Efficiency gegeben wird. Diese bieten auf unterschiedliche Weise eine Unterstützung der Entwicklung energieeffizienter Produkte. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei insbesondere betrachtet, inwiefern die bestehenden methodischen Ansätze eine differenzierte und systematische Verwendung der Zielgröße Energieeffizienz berücksichtigen.

Für die Kommunikation der Energieeffizienz als Zielgröße ist deren Quantifizierung in Form von entsprechenden Maßzahlen und Indikatoren ein grundlegender Bestandteil. Hierzu wird untersucht, welche Anforderungen an diese Maßzahlen zu stellen sind und inwieweit bestehende Ansätze diese erfüllen.

2.1 Der Produktentstehungsprozess

Es existiert eine Vielzahl an Ansätzen, die die übergeordnete Modellierung des komplexen Sachverhalts der Produktentstehung zum Ziel haben. Diese Ansätze zur Metamodellierung der Produktentstehung verfolgen unterschiedliche Zwecke und unterscheiden sich daher beispielsweise in der Betrachtungsperspektive⁹ oder der Betrachtungsebene.

⁹ Gebräuchlich sind hier primär die Perspektiven des Managements oder der Entwicklung

So kann nach BRAUN unter anderem zwischen phasenbasierten und aktivitätenbasierten sowie analytischen, abstrakten und prozeduralen Ansätzen unterschieden werden.¹⁰

Besonders viele Modellierungsansätze beschreiben den Produktentstehungsprozess mit einer sequenziellen Struktur. Dazu gehören u. a. das Vorgehen nach PAHL UND BEITZ¹¹ sowie die Richtlinien VDI 2221¹² und VDI 2206¹³. Nach BRAUN haben diese Ansätze präskriptiven Charakter. Sie dienen somit nicht nur der Beschreibung der Produktentwicklung, sondern liefern auch anleitende Handlungsanweisungen. Die sequenzielle Struktur verhindert jedoch weitestgehend die explizite Abbildung von Iterationen, wie sie in der realen Produktentstehung immer vorkommen¹⁴.

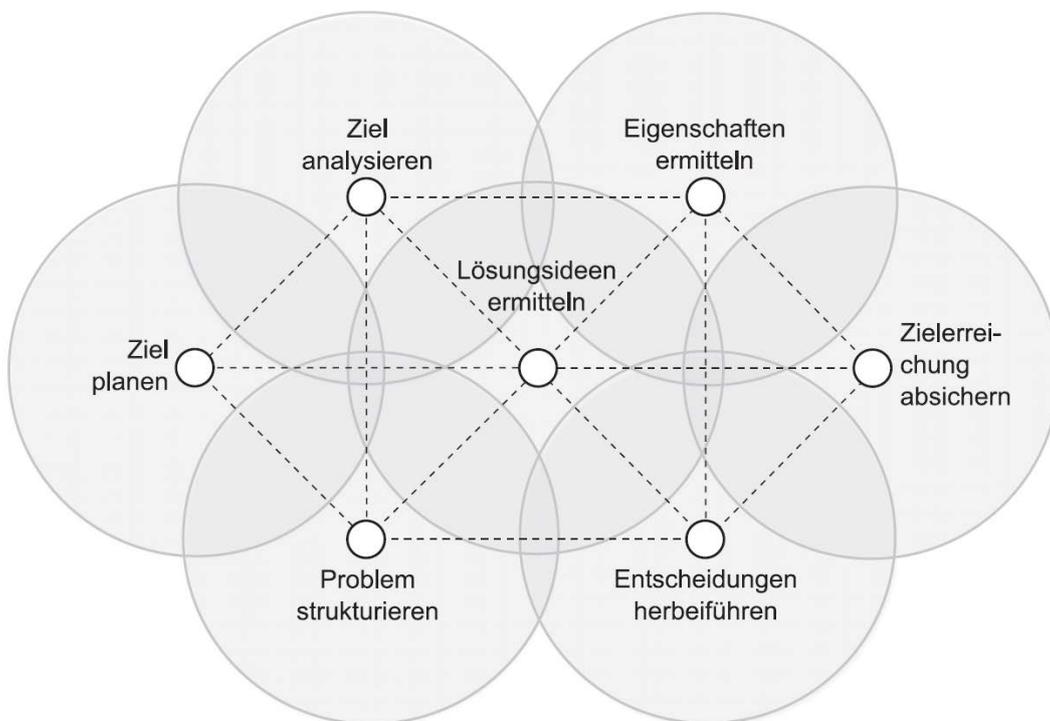


Abbildung 1: Münchner Vorgehensmodell.¹⁵

Ein „Navigationsmodell“¹⁶, das sowohl eine abstrakte Sicht auf die Prozesse der Produktentwicklung bietet und zusammen mit dem Münchner Vorgehensmodell

¹⁰ Vgl. Braun 2013

¹¹ Vgl. Pahl et al. 2007

¹² VDI 2221 (1993)

¹³ VDI 2206 (2004)

¹⁴ Vgl. Albers 2010a und Braun 2013, S.42

¹⁵ Aus Lindemann 2009, S.47

¹⁶ Lindemann 2009, S. 44

(Abbildung 1) die konkreten Handlungen unterstützen soll, ist das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) nach LINDEMANN.

Ein Modell, das insbesondere die wiederkehrenden iterativen Zyklen in der Produktentstehung fokussiert, ist das 3-Zyklen-Modell¹⁷ nach GAUSEMEIER, welches schematisch in Abbildung 2 dargestellt ist.

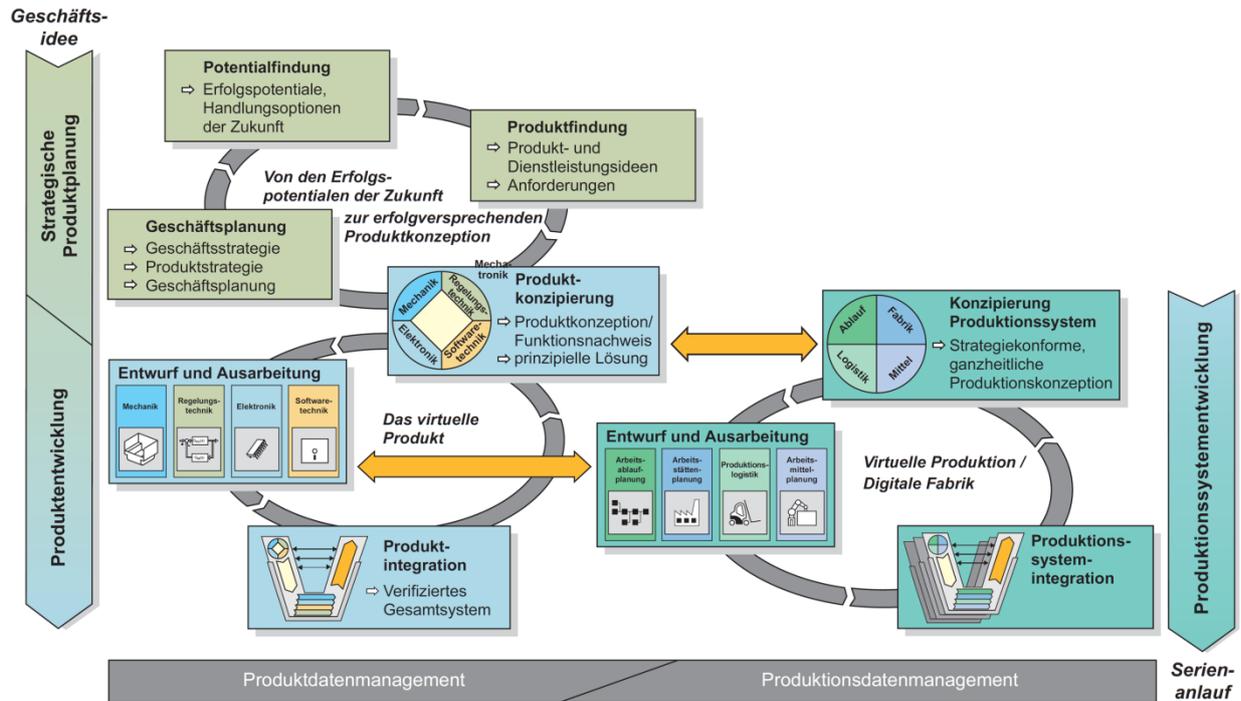


Abbildung 2: 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER ET AL.¹⁸

Da im weiteren Verlauf der Arbeit einzelne Aktivitäten der Produktentstehung sowohl aus statischer Sicht, als auch in Form zeitlicher Abschnitte betrachtet werden, wird für diese Betrachtungen näher auf das ZHO-Modell und das darauf aufbauende integrierte Produktentstehungsmodell nach ALBERS¹⁹ eingegangen. Dieses vereint die Entwicklungssicht mit der management-orientierten Phasensicht und ermöglicht so eine Betrachtung abstrakter generischer Zusammenhänge ebenso wie einzelner konkreter dynamischer Entwicklungsvorgänge.

¹⁷ Vgl. Gausemeier et al. 2012

¹⁸ Aus Gausemeier et al. 2012

¹⁹ Albers; Meboldt 2007

2.1.1 ZHO Modell

Basierend auf den systemtheoretischen Ansätzen nach ROPHOHL²⁰ beschreibt das ZHO-Modell²¹ die Produktentstehung als Wechselwirkung von Zielsystem und Objektsystem²² mittels dem sie verbindenden Handlungssystem. Dabei ist es Gegenstand der Produktentwicklung die Ziele und Anforderungen des Zielsystems in reale oder virtuelle Elemente des Objektsystems zu überführen. Dies erfordert Kompetenzen, Wissen und weitere Ressourcen, deren Gesamtheit wiederum durch das Handlungssystem beschrieben wird.

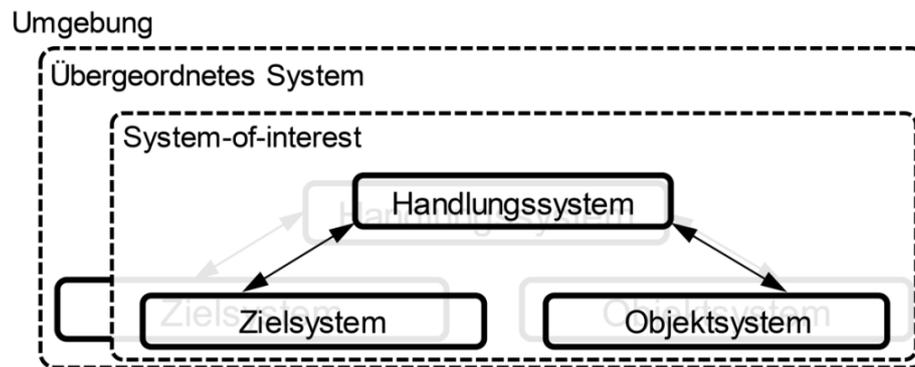


Abbildung 3: ZHO-Modell²³

Nach ALBERS UND MUSCHIK²⁴ ist das Zielsystem eine Beschreibung von gedanklich vorweggenommenen und geplanten Eigenschaften des Objektsystems. Dabei beschreibt das Zielsystem alle relevanten Ziele und Anforderungen, deren Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie Randbedingungen, die für die Entwicklung des richtigen Objektsystems notwendig sind. Auch die Gründe für die jeweiligen Ziele sind darin beschrieben. Das Zielsystem beschreibt somit einen beabsichtigten zukünftigen Zustand, nicht jedoch die Lösung selbst. Im Laufe des Produktentstehungsprozesses wird das Zielsystem permanent erweitert und konkretisiert und dabei verändert.²⁵ Die richtige, durchgängige und möglichst vollständige Erfassung und Abstimmung der Ziele ist die Basis einer erfolgreichen Produktentwicklung und Kernbestandteil der Entwicklungstätigkeit. Das Zielsystem enthält dabei auch indirekt immer den Grund für die Durchführung der einzelnen

²⁰ Ropohl 2009

²¹ ZHO ist ein Akronym der Begriffe Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem

²² Bei Ropohl 2009 „Sachsystem“ genannt, welches mit dem Handlungssystem das soziotechnische System beschreibt, in dem die Produktentstehung stattfindet. Ropohl 2009, S. 47

²³ Aus Lohmeyer 2013 nach Albers; Ebel et al. 2012b

²⁴ Albers; Muschik 2010

²⁵ Meboldt 2008

relevanten Aktivitäten des Handlungssystems. Um das Zielsystem weniger als theoretisches Konstrukt, sondern mehr als die tatsächlich zu beherrschende Gesamtheit der Ziele und Anforderungen zu verstehen, ergänzen ALBERS ET AL.²⁶, dass nur diejenigen Ziele Elemente eines operationalisierbaren Zielsystems sind, die tatsächlich in irgendeiner Form expliziert wurden.

LOHMEYER²⁷ entwickelt das ZHO-Modell weiter und fokussiert dabei den Menschen im Mittelpunkt der Produktentstehung, der das Zielsystem in ein Objektsystem überführt. In diesem erweiterten ZHO-Modell wird der Entwickler als Handlungssystem beschrieben, der basierend auf dem expliziten Zielsystem seinen individuellen Lösungsraum bildet und mögliche Lösungen in Form mentaler Modelle vorausdenkt. Dabei wird das Handlungssystem durch die Analyse des Objektsystems weiterentwickelt, indem die mentalen Modelle des Entwicklers um neue Informationen ergänzt werden. Auf Basis seines neuen Kenntnisstands wird daraufhin das Zielsystem angepasst. Um diesem veränderten Zielsystem gerecht zu werden, wird wiederum das Objektsystem angepasst. So beschreibt LOHMEYER den Produktentstehungsprozess, „welcher in Form einer liegenden Acht als iterative und co-evolutionäre Synthese und Analyse von Ziel- und Objektsystem abgebildet wird“.²⁸ Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4 dargestellt.

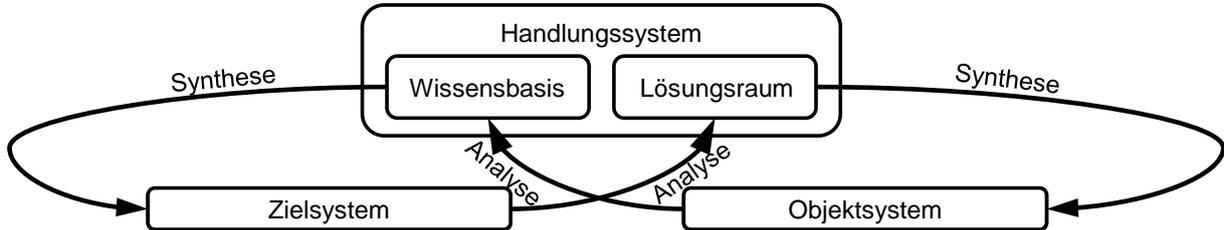


Abbildung 4: Erweitertes ZHO-Modell²⁹

Somit lässt sich bereits auf systemischer Ebene feststellen, dass eine konsistente, transparente und differenzierte Definition und Anpassung des Zielsystems durch das Handlungssystem – und somit im Wesentlichen durch den Entwickler – die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Produktentwicklung ist. Die für die Anpassung des Zielsystems notwendigen Informationen stammen dabei häufig aus der Analyse des Objektsystems.

²⁶ Albers; Ebel et al. 2012b

²⁷ Lohmeyer 2013

²⁸ Lohmeyer 2013, S.4

²⁹ Aus Lohmeyer 2013, S. 122

ALBERS UND MEBOLDT³⁰ entwickeln aufbauend auf dem ZHO-Modell das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM), welches die wichtigsten Aspekte unterschiedlicher Modellierungsansätze zur Beschreibung und Implementierung von Produktentstehungsprozessen vereint.³¹

2.1.2 Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)

Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) nach ALBERS³² ist ein Ansatz zur Modellierung des Systems der Produktentstehung. Da es sich um ein Metamodell handelt, enthält es alle Elemente zur Ableitung angepasster Modelle. Mithilfe dieses Rahmens lassen sich die Elemente der Produktentstehung zu unterschiedlichen Zwecken, wie Forschung und Praxisanwendung modellieren. Entsprechend dem zugrunde liegenden ZHO-Modell der Systemtechnik bildet auch im iPeM die Überführung des Zielsystems in das Objektsystem durch die Aktivitäten des Handlungssystems³³ die Grundlage für die Modellierung und Unterstützung der Produktentstehung.

Tabelle 1: Problemlösungsaktivitäten nach SPALTEN

Problemlösungsaktivität	Inhalte
Situationsanalyse	Situationsverständnis und Informationsbasis für das weitere Problemlösungsvorgehen aufbauen.
Problemeingrenzung	Ermittlung des Ist- und des Sollzustandes sowie der Gründe für eine Abweichung.
Suche Alternativer Lösungen	Erzeugung einer Lösungsvielfalt
Lösungsauswahl	Auswahl der technisch und wirtschaftlich besten Lösung
Tragweitenanalyse	Analyse von Risiken und Chancen sowie Ableitung von Maßnahmen
Entscheiden und Umsetzen	Steuerung und Überwachung der Lösungsumsetzung
Nachbereiten und Lernen	Erkennung und Dokumentation von Potenzialen und Defiziten für zukünftige Problemlösungsprozesse

³⁰ Albers; Meboldt 2007 und Meboldt 2008. Das iPeM wird in zahlreichen Arbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung unter Prof. Albers weiterentwickelt. Vgl. Braun 2013

³¹ Braun; Ebel et al. 2013

³² Albers; Meboldt 2007

³³ Das Handlungssystem beinhaltet neben den Aktivitäten auch das Ressourcensystem

Um dabei in den einzelnen Produktentstehungsaktivitäten eine systematische und zielführende Vorgehensweise zu unterstützen wird mit dem SPALTEN-Ansatz³⁴ (Akronym entsprechend der Teilschritte nach Tabelle 1) eine geeignete Problemlösungsmethodik bereitgestellt. Der SPALTEN-Ansatz ist fraktal, das heißt dass einzelne SPALTEN-Aktivitäten wiederum durch einen SPALTEN-Prozess beschrieben werden können.

Die zeilen- und spaltenweise Gegenüberstellung der Problemlösungs- und der Produktentstehungsaktivitäten bildet die sogenannte Aktivitätenmatrix. Abbildung 5 zeigt eine Darstellung des iPeM, in welcher links die Aktivitätenmatrix abgebildet ist. Dieser statische Teil des Modells enthält vertikal angeordnet alle wesentlichen Aktivitäten der Produktentstehung. Ausgehend von diesen Aktivitäten können projektbezogene Abläufe in die zeitliche Dimension projiziert werden und bilden so das Phasenmodell, welches den dynamischen Teil des iPeM darstellt (Abbildung 5, rechte Seite). Somit können projektspezifische Aktivitäten gleichermaßen aus Sicht der Entwicklung, als auch aus Sicht des Managements abgebildet werden, was nach ALBERS einer der wesentlichen Vorteile des iPeMs darstellt³⁵.

Das iPeM ist eines der zentralen Rahmenwerke der Karlsruher Schule³⁶.

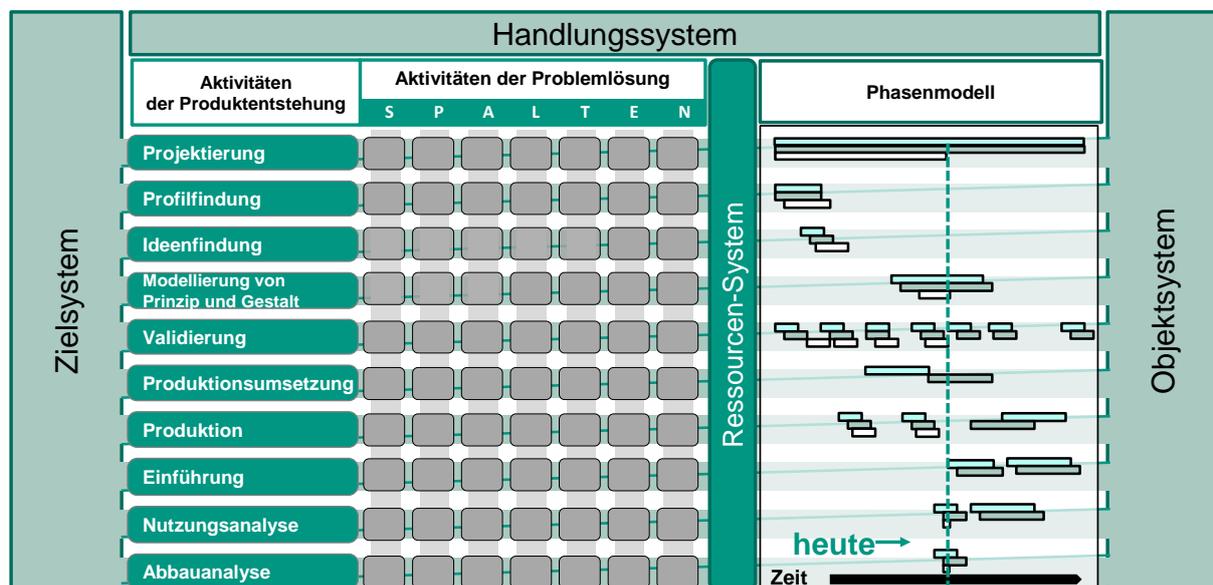


Abbildung 5: Integriertes Produktentstehungsmodell (iPeM)

³⁴ Vgl. Albers; Burkardt et al. 2005

³⁵ Vgl. Albers 2010a

³⁶ Die „Karlsruher Schule“ stellt einen generalisierten Rahmen für die Produktentstehung dar. Er basiert auf langjährigen Erfahrungen in Wissenschaft und Praxis am IPEK – Institut für Produktentwicklung und gründet sich auf Hypothesen, die zahlreiche Arbeiten aus dem Stand der Forschung aufgreifen. (vgl. Albers 2010a und Braun 2013, S.15).

Da im folgenden Abschnitt³⁷ einige Aktivitäten der Produktentstehung zur Begründung wesentlicher Elemente des Design to Energy Efficiency herangezogen werden, sollen diese im Folgenden näher erläutert werden:

Die **Projektierung** umfasst nach ALBERS³⁸ alle Tätigkeiten, die das Management für Organisation und Controlling eines Produktentstehungsprojekts benötigt. Sie dient der Planung von Prozessen und initiiert Änderungen innerhalb von Prozessen. Die Projektierung beinhaltet die Definition eines initialen Zielsystems sowie Definition, Überwachung und Anpassung des Handlungssystems inklusive der Planung logischer und zeitlicher Abfolgen der Aktivitäten im Phasenmodell.

In der **Profilfindung** werden Zweck und Funktionseigenschaften³⁹ des zukünftigen Produktes und damit auch die Innovationsaufgabe festgelegt. Dies beinhaltet die Identifikation von Kunden- und Anbieternutzen.⁴⁰ Eine Kerntätigkeit ist eine strategische Identifikation von Marktpotenzialen für mögliche Produkte und deren Zuordnung zu Marktsegmenten. Daher werden hier primär aktuelle und zukünftige Märkte⁴¹ und Technologien analysiert, um Marktvolumen sowie -entwicklung abschätzen zu können.⁴² Eine praktische Orientierung des Produktprofils am Markt erfordert jedoch bereits die Festlegung bestimmter Produkteigenschaften. Im Rahmen der Profilfindung findet daher in der Regel bereits eine temporäre Konkretisierung der Produkteigenschaften statt, da nur so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Profildefinition geschaffen werden kann.

Gemäß der dritten Hypothese der Produktentstehung nach ALBERS⁴³ ist die **Validierung** eine zentrale Aktivität der Produktentstehung. Diese muss die eigentliche Synthese des Produkts kontinuierlich bis hin zu seiner vollständigen Reife begleiten. Dabei findet nicht nur eine Validierung der Produkteigenschaften statt, sondern ebenso eine Validierung der einzelnen Elemente des Objektsystems, die sich als Ergebnisse aus den einzelnen Produktentstehungsaktivitäten ergeben. Im Rahmen der Verifizierung von Produkteigenschaften als ein Bestandteil der Validierung, werden einzelne Eigenschaften charakterisiert und mit den geforderten Zielgrößen verglichen. Die Validierung hingegen berücksichtigt zusätzlich, welche

³⁷ Vgl. 2.1.3 Wesentliche Produktentstehungsaktivitäten im Design to Energy Efficiency

³⁸ Albers 2014d

³⁹ Alink 2010 definiert nach Hansen 1968 die Funktion eines technischen Gebildes oder Verfahrens als beabsichtigten Zweck oder tatsächliches Verhalten im Sinne der auszuübenden Wirkungen.

⁴⁰ Vgl. Braun 2013, S.89

⁴¹ Ein Markt besteht aus den drei Elementen Hersteller, Kunde und Wettbewerb, sowie den marktbestimmenden Einflussfaktoren, wie Technologien, Gesetze, etc. (Vgl. Meboldt 2008)

⁴² Vgl. Meboldt 2008

⁴³ Vgl. Albers; Braun 2011

Merkmale und Eigenschaften für den Anwender und Kunden des Produkts überhaupt relevant sind. Der Anwender eines Produkts ist an dessen Anforderungserfüllung unter für ihn relevanten Bedingungen interessiert. Da die Produktentstehung ein iterativer Prozess ist, finden in den einzelnen Iterationen kontinuierliche Validierungsaktivitäten statt.⁴⁴

2.1.3 Wesentliche Produktentstehungsaktivitäten im Design to Energy Efficiency

Insbesondere die im Design to X⁴⁵ vorgenommene Fokussierung einzelner Produkteigenschaften bedarf einer ausführlichen Analyse dieser eigentlich angestrebten Lösungseigenschaft. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Energieeffizienz als die wesentliche zu fokussierende Produkteigenschaft untersucht, weshalb in den folgenden Kapiteln vorwiegend auf den Begriff des Design to Energy Efficiency verwiesen wird.

In allen Ausprägungen des Design to X aber auch des Design for X⁴⁶, welche die Fokussierung bestimmter Lösungseigenschaften (X) zum Gegenstand haben, ist es essenziell, diese Lösungseigenschaften möglichst früh im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen.⁴⁷ Dadurch rücken insbesondere diejenigen Aktivitäten der Produktentstehung, in welchen bereits die grundlegenden Entscheidungen für den weiteren Produktentstehungsprozess getroffen werden, in den Vordergrund⁴⁸ (vgl. Abbildung 6).

Im Rahmen der Profilfindung wird die Grundlage für viele initiale Ziele⁴⁹ und erste Anforderungen festgelegt, in der Projektierung die dafür zu berücksichtigenden restriktiven Randbedingungen.⁵⁰ Ziele und Restriktionen legen gemeinsam die wesentlichen Begrenzungen des Lösungsraums fest⁵¹, dabei können sie jedoch auch bereits Hinweise für zu entwickelnde Lösungen im weiteren Produktentstehungsprozess beinhalten.

⁴⁴ Vgl. Albers; Düser 2011

⁴⁵ Design to/for X beschreibt die gerechte Gestaltung technischer Produkte bezüglich bestimmter Produkteigenschaften oder Produktlebenszyklusphasen (X). Vgl. 2.2.3

⁴⁶ Vgl. Abschnitt 2.2.3

⁴⁷ Vgl. Stöber; Faerber et al. 2007 und Aspekte des Frontloadings nach Schwarz 2013, S. 33

⁴⁸ Vgl. Vielhaber, 2011, S.7f

⁴⁹ Vgl. Abschnitt 2.2.2

⁵⁰ Vgl. Abschnitt 2.1.2

⁵¹ Vgl. Pahl et al. 2005 und Lohmeyer 2013

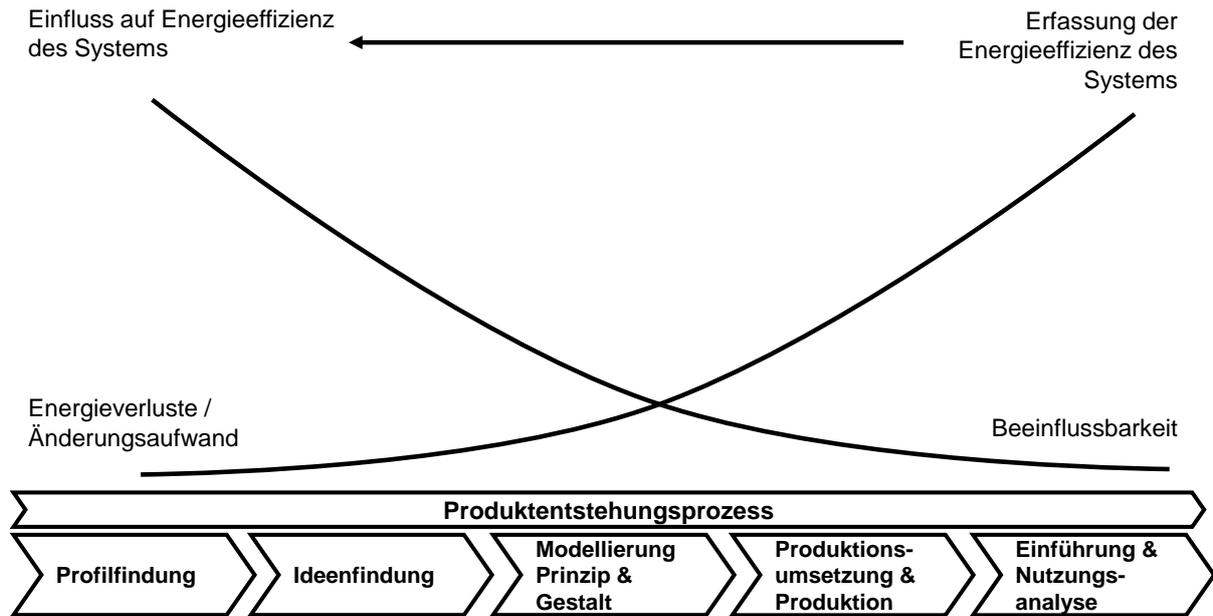


Abbildung 6: Beeinflussbarkeit und Erfassbarkeit der Energieeffizienz über ausgewählten Aktivitäten der Produktentstehung.⁵²

Die Formulierung von Aufgaben beinhaltet nach EHRENSPIEL⁵³ die Festlegung der Ziele, die unter anderem im Zielsystemen dokumentiert werden. Diese Ziele bilden daraufhin die Grundlage für die weitere Produktentstehung, weshalb die richtigen Zielvorgaben eine zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Produktentwicklung darstellt. Der DIN-Fachbericht ISO/TR 14062⁵⁴ betont die Wichtigkeit einer produktspezifischen Berücksichtigung von Zielen, wie Energieeffizienz oder anderer Umweltaspekte, da nur so deren Integration gelingen kann. Eine produkt- oder unternehmensspezifische Verwendung setzt jedoch ein ebenso spezifisches Verständnis voraus, welches bereits in den Aktivitäten Projektierung und Profilfindung entwickelt werden muss.

Der Begriff der Profildefinition beschreibt nicht ausschließlich die Produktentstehungsaktivität der Profilfindung sondern bezeichnet auch die zeitliche Phase, in welcher ein Cluster von unterschiedlichen Aktivitäten der Produktentstehung durchlaufen wird, um schließlich zur Definition eines Produktprofils zu gelangen. Dies ist beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt. Ein solches Aktivitätencluster mit dem Ziel der Profildefinition kann neben den kontinuierlichen und iterativen Validierungsschritten auch Aktivitäten der Ideenfindung oder der Modellierung von Prinzip und Gestalt beinhalten. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn einzelne Produktprofile für eine

⁵² Eigene Darstellung nach Müller et al. 2008

⁵³ Ehrlenspiel 2007, S.89

⁵⁴ Vgl. 2003, S.34

Bewertung gedanklich oder in Form von Modellen konkretisiert werden. Werden sie zusätzlich mit bestehenden Produkten verglichen, wie es in der betrieblichen Praxis bei Produktgenerationenentwicklung üblich ist⁵⁵, so sollten auch Aktivitäten der Nutzungsanalyse bereits hierbei miteinbezogen werden, was ebenfalls in Abbildung 7 dargestellt ist. Daher ist es wichtig, kontextbezogen unter dem Begriff der Profildefinition nicht ausschließlich die Aktivitäten der Profilfindung zu verstehen.

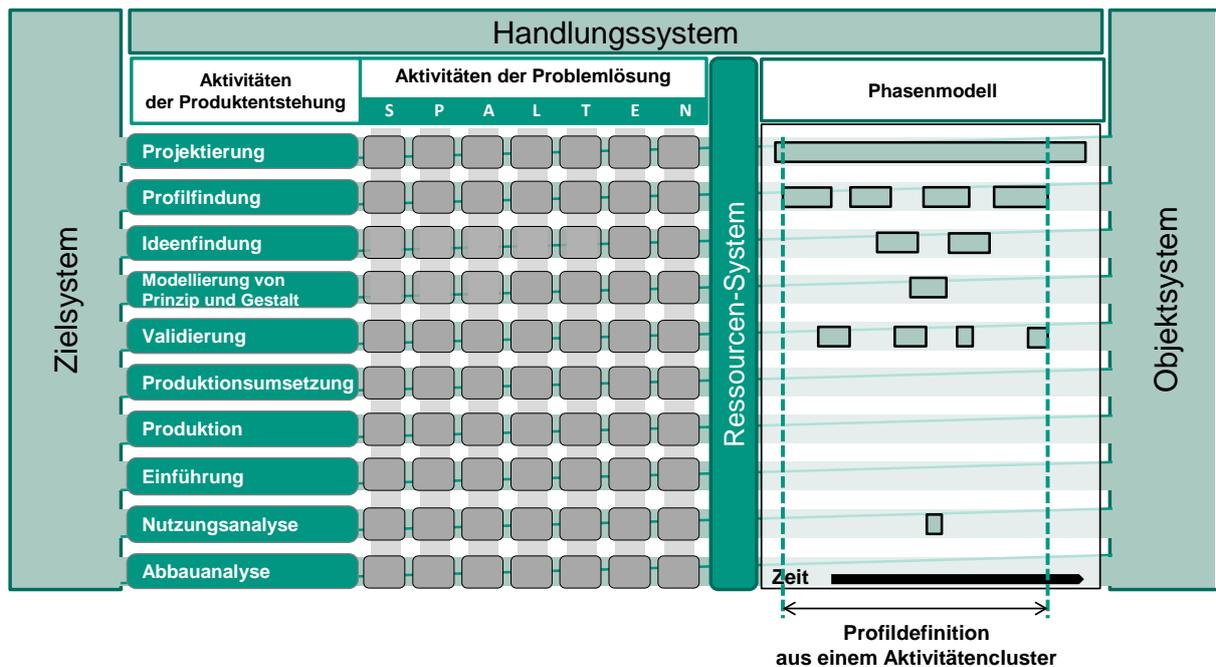


Abbildung 7: Darstellung eines beispielhaften Aktivitätsclusters zur Beschreibung der Abläufe während einer Profildefinition.

Da die Projektierung die Prozess- und Projektplanung beinhaltet, ist für diese Aktivität eine erste Abschätzung einer Priorisierung von Zielen, die Identifikation und eine zumindest qualitative Bewertung von Potenzialen sowie die Verknüpfung dieser Aspekte mit den dadurch zu erwartenden Ressourcenaufwänden elementar. Durch den generischen Charakter der Energieeffizienz sind gerade eine solche Bewertung ihrer spezifischen Relevanz⁵⁶ und des damit verknüpften zu erwartenden Wertschöpfungspotenzials zu einem frühen Zeitpunkt schwierig⁵⁷ und bedürfen einer gezielten Unterstützung des Produktentwicklers.

In der Profilfindung werden die wesentlichen Ziele aus dem Produktprofil abgeleitet. Dabei ist insbesondere diese Ableitung von verdichteten Zielen ein wesentlicher

⁵⁵ Vgl. Albers 2011b

⁵⁶ Die Relevanz beschreibt die Einschätzung der Wichtigkeit oder Bedeutsamkeit, die einer Sache in einem bestimmten sachlichen oder fachlichen Zusammenhang zugeordnet wird.

⁵⁷ Albers; Martin et al. 2014

Aspekt früher Entscheidungen mit hoher Tragweite und gegebenenfalls kritischem Umsetzungsaufwand. Ein frühzeitiges und korrektes Treffen von Entscheidungen, insbesondere im Design to X, ist essenziell für eine erfolgreiche Berücksichtigung der zu fokussierenden Lösungseigenschaften sowie des damit verbundenen Lösungsaufwands. Der frühe Zeitpunkt soll eine möglichst ausführliche Berücksichtigung von Wechselwirkungen (Zielrelationen) bei komplexen Entscheidungsfindungen ermöglichen und in realen Entwicklungsprozessen regelmäßig auftretende Iterationsschleifen in ihrem Umfang minimieren oder optimieren. Die Korrektheit der Entscheidung meint hierbei die Notwendigkeit bei der Entscheidungsfindung möglichst alle relevanten Anforderungen zu berücksichtigen.⁵⁸ Wiederum ist es der generische Charakter der Zielgröße Energieeffizienz, der eine Ableitung eindeutiger und objektiver (reproduzierbarer) Energieeffizienzanforderungen erschwert.

Durch kontinuierliche Validierung und Verifikation werden Aktualität und Validität der Ziele und Randbedingungen sichergestellt. Die Validierung von Produkteigenschaften setzt in gewissem Maße eine Operationalisierbarkeit und somit eine Messbarkeit dieser Produkteigenschaften voraus. Da die Energieeffizienz jedoch zunächst nur ein theoretisches Konstrukt darstellt und auf sehr unterschiedliche Weise messbar gemacht werden kann, ist die Validierung im Design to Energy Efficiency ebenfalls als eine wesentliche Herausforderung zu betrachten.

Bei Verwendung von Metamodellen der Produktentstehung, wie beispielsweise des iPeM⁵⁹ können Erfahrungen dokumentiert und für eine spätere Wiederverwendung als Modell bereitgestellt werden. Auf diesem Weg können bereits die ersten Aktivitäten der Produktentstehung wesentlich unterstützt werden. Dabei muss sich der Produktentwickler häufig nicht nur auf Erfahrungen aus direkten Vorgängerprojekten beschränken: Entgegen der theoretischen Lehrmeinung in der Methodikforschung, ein Großteil der Innovationen würde auf Neukonstruktionen basieren, geht ALBERS⁶⁰ davon aus, dass 90% der Innovationen auf evolutionären Neuentwicklungen beruhen und bezeichnet dies als Produktgenerationsentwicklung. Dies bedeutet, dass die überwiegende Mehrzahl innovativer Produkte auf Vorgängertösungen basiert und in bekannter technologischer Umgebung entwickelt wurden.⁶⁰

2.1.4 Zwischenfazit

Die Produktentstehung lässt sich nach dem ZHO-Modell als Wechselwirkung des Handlungssystems mit Zielsystem und Objektsystem beschreiben. Für eine

⁵⁸ Vgl. Tichem 1997

⁵⁹ Vgl. Abschnitt 2.1.2

⁶⁰ Albers 2011b

erfolgreiche Produktentwicklung bedarf es einer kontinuierlichen Erweiterung und Validierung des Zielsystems. Das integrierte Produktentstehungsmodell ermöglicht eine Abbildung der Produktentstehung als soziotechnischem System sowohl aus Sicht der Entwicklung, als auch aus Managementsicht und führt ZHO-Modell, Prozesssicht sowie die zwei Ebenen der Aktivitäten zusammen zu einem Metamodell der Produktentstehung. Mithilfe dieses Metamodells können Methoden und Werkzeuge den wiederkehrenden Problemlösungsaktivitäten zugeordnet werden. Auf diesem Weg wird das Dokumentieren und Auffinden geeigneter aktivitätenspezifischer methodischer Unterstützung für den Produktentwickler ermöglicht.

Projektierung, Profilfindung und Validierung stellen wesentliche Aktivitäten der Produktentstehung im Kontext des Design to Energy Efficiency dar. Bereits bei deren generischer Betrachtung wird deutlich, dass die Ressourcenplanung entsprechend der zu erwartenden projektspezifischen Zielrelevanz und -priorisierung im Rahmen der Projektierung, ebenso wie die kontinuierlichen Validierungsaktivitäten eine besondere Wichtigkeit für eine erfolgreiche Produktentstehung haben. Im Rahmen der Profilfindung findet die grundlegende Ausrichtung der initialen Ziele statt, was insbesondere für das abstrakte Ziel Energieeffizienz einen kritischen Aspekt darstellt.

2.2 Ziele und Anforderungen

2.2.1 Ziel- und Anforderungsbegriff

Nach ROPOHL ist ein Ziel „ein als möglich vorgestellter Sachverhalt, dessen Verwirklichung erstrebt wird. [...] Sachverhalte sind z. B. Zustände, Gegenstände, Handlungen, Prozesse, Beziehungen. Einen bereits bestehenden Sachverhalt in Zukunft zu erhalten, bedeutet einen Sonderfall der vorstehenden Definition. Ein Ziel wird in einem Zielsatz formuliert. Ein Zielsatz enthält zwei Bestandteile: (a) die beschreibende Kennzeichnung des Sachverhaltes, (b) die Auszeichnung dieses Sachverhaltes als erstrebt, erwünscht, gefordert, befürwortet.“⁶¹ In diesem Sinne versteht auch ALBERS Ziele als eine Beschreibung von gedanklich vorweggenommenen und geplanten Eigenschaften des Objekts.⁶² Weiterhin beschreiben Ziele einzelne Aspekte eines beabsichtigten zukünftigen Zustands. Sie dienen der Orientierung des Entwicklungsvorgangs und bestimmen gemeinsam mit den restriktiven Randbedingungen die Lösung, bzw. den Lösungsraum, zu technischen Aufgabenstellungen.⁶³ Dabei werden die Ziele selbst nicht nur durch ihre

⁶¹ Ropohl 2009, S.151, vgl. auch VDI 3780, 3;

⁶² Vgl. Albers; Muschik 2010

⁶³ Vgl. Pahl et al. 2005

Eigenschaften, wie Optimierungsrichtung oder ihren Wert beschrieben, sondern auch durch die Anzahl und Art der Wechselwirkungen zwischen ihnen.⁶⁴

In der Entwicklungsmethodik gibt es keine einheitliche Definition, wie Ziel- und Anforderungsbegriff zu trennen sind. Grundsätzlich stimmt die maßgebliche Literatur jedoch überein, dass Ziele einen eher abstrakten Charakter haben können, wohingegen Anforderungen die vom Produktentwickler operativ handzuhabenden konkreten Vorgaben enthalten. Nach EHRENSPIEL sind Ziele als Soll-Vorgaben des Auftraggebers zu verstehen, die unscharf sein können. Anforderungen hingegen sind die von der Konstruktion aus den Zielen umformulierten Solleigenschaften, die vom Produktentwickler bearbeitbar sind. EILETZ versteht Ziele als „gemeinsam vereinbarte zukünftige Soll-Zustände, die durch aktives Handeln erstrebt oder vermieden werden“⁶⁵. Anforderungen hingegen beschreibt er als (un-)erwünschte Eigenschaften oder Sachverhalte. Nach VDI 2223 beschreiben Anforderungen sämtliche Forderungen und Bedingungen an die Eigenschaften und an das Verhalten eines Produkts (oder einer Dienstleistung).⁶⁶ Die möglichst vollständige Erfassung und ihre Anpassung unter Berücksichtigung der herrschenden Randbedingungen ist die Grundlage einer erfolgreichen Produktentwicklung.⁶⁷ Anforderungen legen qualitative oder quantitative Eigenschaften oder Bedingungen für eine Lösung fest. Nach LOHMEYER⁶⁸ ist eine Anforderung „eine durch einen Wert oder einen Wertebereich festgelegte Beschreibung eines einzelnen Produktmerkmals.“ Dabei kann eine Anforderung „ein Ziel nicht ersetzen, sondern lediglich konkretisierend beschreiben.“ Dabei lassen sich für Anforderungen unterschiedliche Gewichtungen festlegen.⁶⁹ Anforderungen können unter verschiedenen Gesichtspunkten in ihrer Art unterschieden werden. So wird zwischen Mindestforderungen, Bereichsforderungen, Festforderungen und Wunschforderungen unterschieden. Ebenso kann im Sinne des Kano-Modells⁷⁰ zwischen Begeisterungs-, Leistungs- und Grundanforderungen unterschieden werden (Abbildung 8).

⁶⁴ Vgl. Martin 2009 (Abschlussarbeit)

⁶⁵ Eiletz 1999

⁶⁶ VDI 2223 (2004)

⁶⁷ Meboldt 2008, Vgl. auch Abschnitt 2.1.1

⁶⁸ Vgl. Lohmeyer 2013, S.61

⁶⁹ VDI 2221 (1993)

⁷⁰ Das Kano-Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen Kundenzufriedenheit und der Merkmalsausprägung unterschiedlicher Produktmerkmale oder -anforderungen.

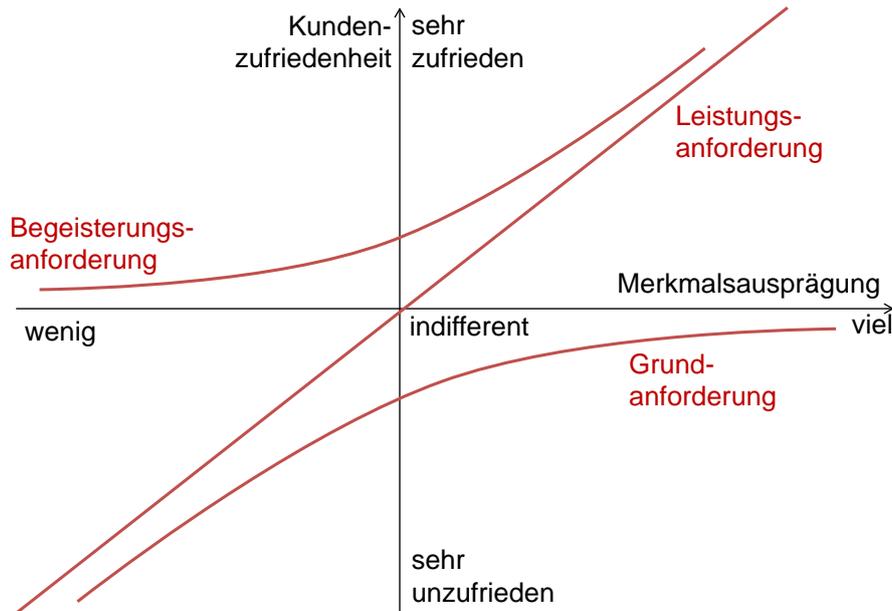


Abbildung 8: Kano-Modell

Auf die Aspekte Unsicherheit und Unschärfe wird bei der Betrachtung von Zielen und Anforderungen in dieser Arbeit nicht detailliert eingegangen. Hierfür sei auf andere im Rahmen dieser Reihe erschienen arbeiten verwiesen.⁷¹

Die Gesamtheit aller dieser (relevanten) Ziele und Anforderungen, deren Abhängigkeiten, Wechselwirkungen und Begründungen sowie Randbedingungen bildet das Zielsystem.⁷²

2.2.2 Entwicklung von Zielsystemen

Der Begriff des Zielsystems wird bereits in Abschnitt 2.1.1 eingeführt und definiert. Das initiale Zielsystem wird von OERDING⁷³ als eine anfängliche Zusammenstellung von vagen Zielen beschrieben, deren kontinuierliche Weiterentwicklung und Konkretisierung das zentrale Element jeder Produktentstehung ist. LOHMEYER definiert das initiale Zielsystem⁷⁴ darauf aufbauend als eine Zusammenfassung der ersten grundlegenden Ziele. Es wird zu Beginn des Produktentstehungsprozesses in der Aktivität Projektierung erstellt. Das initiale Zielsystem bildet den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung des Zielsystems und stellt damit auch eine zentrale Arbeitsumgebung für den Produktentwickler dar, in welcher alle zielrelevanten Informationen von den Beteiligten aufzufinden und auch zu dokumentieren sind.

⁷¹ Vgl. beispielsweise Lohmeyer 2013 oder Muschik 2011

⁷² Vgl. Abschnitt 2.1.1

⁷³ Oerding 2009

⁷⁴ Ursprünglich auch als primäres Zielsystem bezeichnet (Vgl. Lohmeyer 2007 (Abschlussarbeit))

ALBERS⁷⁵ stellt für die Entwicklung und Handhabung von Zielen einige Faktoren für eine erfolgreiche Produktentwicklung heraus:

- gemeinsame mentale Modelle, um eine gute Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams zu ermöglichen. (Vgl. Abbildung 9)
- Transparenz und Kontinuität bezüglich der formulierten Ziele und ein systematisches Vorgehensmodell, um ein zielorientiertes und valides Vorgehen zu ermöglichen.
- Know-How, Werkzeuge und Methoden zur Unterstützung der Problemlösung sowie eine generalisierte Struktur (Metamodell) für Planung und Controlling der Produktentstehungsaktivitäten.

Ebenfalls stellen ALBERS ET AL.⁷⁶ fest, dass gemeinsame Erklärungsmodelle, die auf gemeinsam verwendeten mentalen Modellen basieren, eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams sind, da nur so eine zielführende Kommunikation im Verständnis von Zielen erreicht werden kann. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 dargestellt. Da sich Produktentwicklungsteams heutzutage häufig interdisziplinär zusammensetzen, lässt sich diese Erkenntnis gut auf die heutige Entwicklungspraxis übertragen.

Dabei bieten die richtungsweisenden Aktivitäten der Produktentstehung, wie beispielsweise Aktivitäten der Projektierung und der Profilfindung ein besonders großes Potenzial, diejenigen Faktoren zu beeinflussen, die maßgeblich über den Erfolg des zu entwickelnden Produkts entscheiden⁷⁷, was bereits in Abschnitt 2.1.3 behandelt wird und schematisch in Abbildung 6 dargestellt ist.

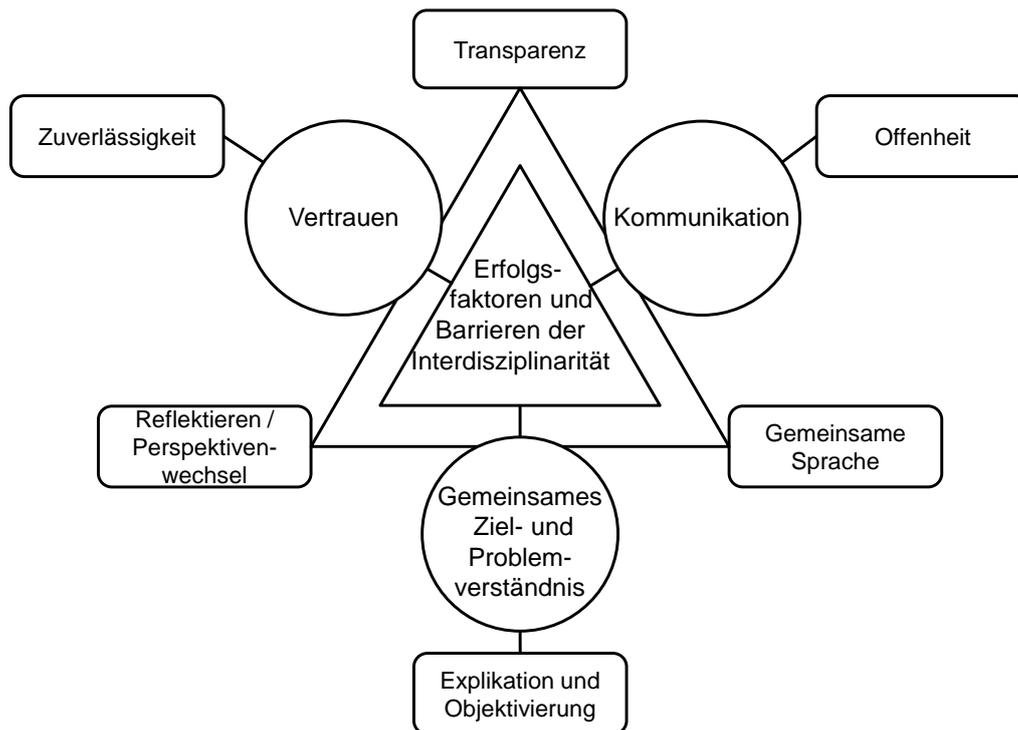
Nach VDI 2221 ist der erste Arbeitsschritt das „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“. Dieser ist notwendig „um die Anforderungen der vom Kunden oder der Produktplanung formulierten Aufgabe zu klären und zu präzisieren. Dazu gehören das Zusammentragen aller verfügbaren Informationen und das Erkennen von Informationslücken, das Überprüfen und Ergänzen der externen Anforderungen, das Hinzufügen unternehmensinterner Anforderungen sowie das Formulieren der Aufgabenstellung aus der Sicht des Konstrukteurs einschließlich bereits möglicher und notwendiger Strukturierungen.“⁷⁸

⁷⁵ Albers 2011b

⁷⁶ Albers; Ebel et al. 2011a

⁷⁷ Vgl. Albers; Muschik et al. 2010

⁷⁸ VDI 2221 (1993), S.9f

Abbildung 9: Erfolgsfaktoren der Interdisziplinarität.⁷⁹

BADER⁸⁰ teilt die Erarbeitung von Zielen in drei wesentliche Aufgabenschritte auf: Die Bestimmung von Zielfeldern („Welche Themen müssen beschrieben werden“), die Generierung von Zielmerkmalen („Wie können die Themen beschrieben werden“) sowie die Festlegung der Zielausprägung („Wie gut muss das Thema umgesetzt werden?“). Dabei wird bei der Definition der geforderten Zielausprägungen zunächst jede Zielausprägung unabhängig von den anderen Produktzielen bestimmt. Eine Konsistenzprüfung des gesamten Zielsystems erfolgt in einem nachfolgenden Schritt. Die Herleitung der Einzelziele wird mit der Dokumentation der zugrunde liegenden strategischen Ziele für jedes Zielfeld begründet.⁸¹ Für Ziele, wie Energieeffizienz, die per Definition mehrere Zielaspekte in der Zielsetzung des Nutzens und des energetischen Aufwands berücksichtigen müssen und deren Verhältnis zueinander beschreiben, ist dies jedoch nur sehr beschränkt anwendbar.

Die Entwicklung von Anforderungen umfasst die Ziel- und Anforderungserfassung und deren Weiterentwicklung. Hierfür werden in der Regel methodische Hilfsmittel wie beispielsweise Checklisten, Fragelisten und Leitlinien empfohlen⁸². Dabei ist die möglichst vollständige Erfassung und korrekte Festlegung von Anforderungen und

⁷⁹ Aus Albers; Ebel et al. 2011a

⁸⁰ Bader 2007

⁸¹ Bader 2007, S.38

⁸² Vgl. Lohmeyer 2013, S. 44

Zielen besonders wichtig.⁸³ Die Anforderungen sollten sich dabei immer an Kunde und Markt orientieren, wobei die Erfassung und Interpretation von Informationen eine wesentliche Hürde und einen zentralen Tätigkeitsanteil für den Produktentwickler darstellen: Die Informationsgewinnung erfolgt neben vielen anderen Quellen vor allem durch konkrete Aufgabenstellungen, aber auch durch „Fragen stellen“⁸⁴. Den entwickelten Anforderungen fällt dabei die Aufgabe zu, die Gesamtheit der Ziele in die Formulierung von handhabbaren, geforderten Ausprägungen zu überführen⁸⁵. Neben Kunde und Markt stellt der Anbieternutzen naturgemäß einen weiteren wesentlichen Ursprung für die Definition von Zielen und Anforderungen dar.

Nach PAHL ET AL.⁸⁶ ist es Aufgabe des Produktentwicklers, die lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktspezifikationen aus den ihm zur Verfügung stehenden Informationen zu erkennen und nach Möglichkeit mit quantitativen Angaben zu formulieren und zu dokumentieren. COOPER ET AL.⁸⁷ unterscheiden basierend auf mehreren realen Prozessanalysen drei Ebenen der Anforderungserfassung: Informationserfassung, -transformation und die anschließende Generierung von Anforderungen (Abbildung 10).

Ein grundsätzliches Problem in der Handhabung von Anforderungen sehen CHAKRABARTI ET AL. dabei neben den Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Anforderungen im Verstehen der Ziele und Anforderungen hinsichtlich ihrer relativen Wichtigkeit.⁸⁸ Dies gilt insbesondere für abstrakte Forderungen, wie der nach Energieeffizienz.

Mit der Bewertung von Zielbeziehungen beschäftigt sich auch ZANGEMEISTER, der das Zielsystem als eine geordnete Menge handlungsbestimmender Ziele versteht, welche für sinnvolle Entscheidungen zu berücksichtigen sind.⁸⁹ Die Zielbeziehungen können dabei technologischer oder klassifikatorischer Art sein. Nach BAUER sind Zielkonkurrenz, Zielkomplementarität und Zielindifferenz insbesondere für technologische Zielbeziehungen von Bedeutung und liegen in der Regel symmetrisch vor.⁹⁰

⁸³ Ehrlenspiel 2007, S.374

⁸⁴ Pahl et al. 2005, S.65

⁸⁵ Albers, 2014e

⁸⁶ Pahl et al. 2007

⁸⁷ Cooper et al. 1998

⁸⁸ Vgl. Chakrabarti et al. 2004

⁸⁹ Vgl. Zangemeister 1976

⁹⁰ Vgl. Bauer 2009

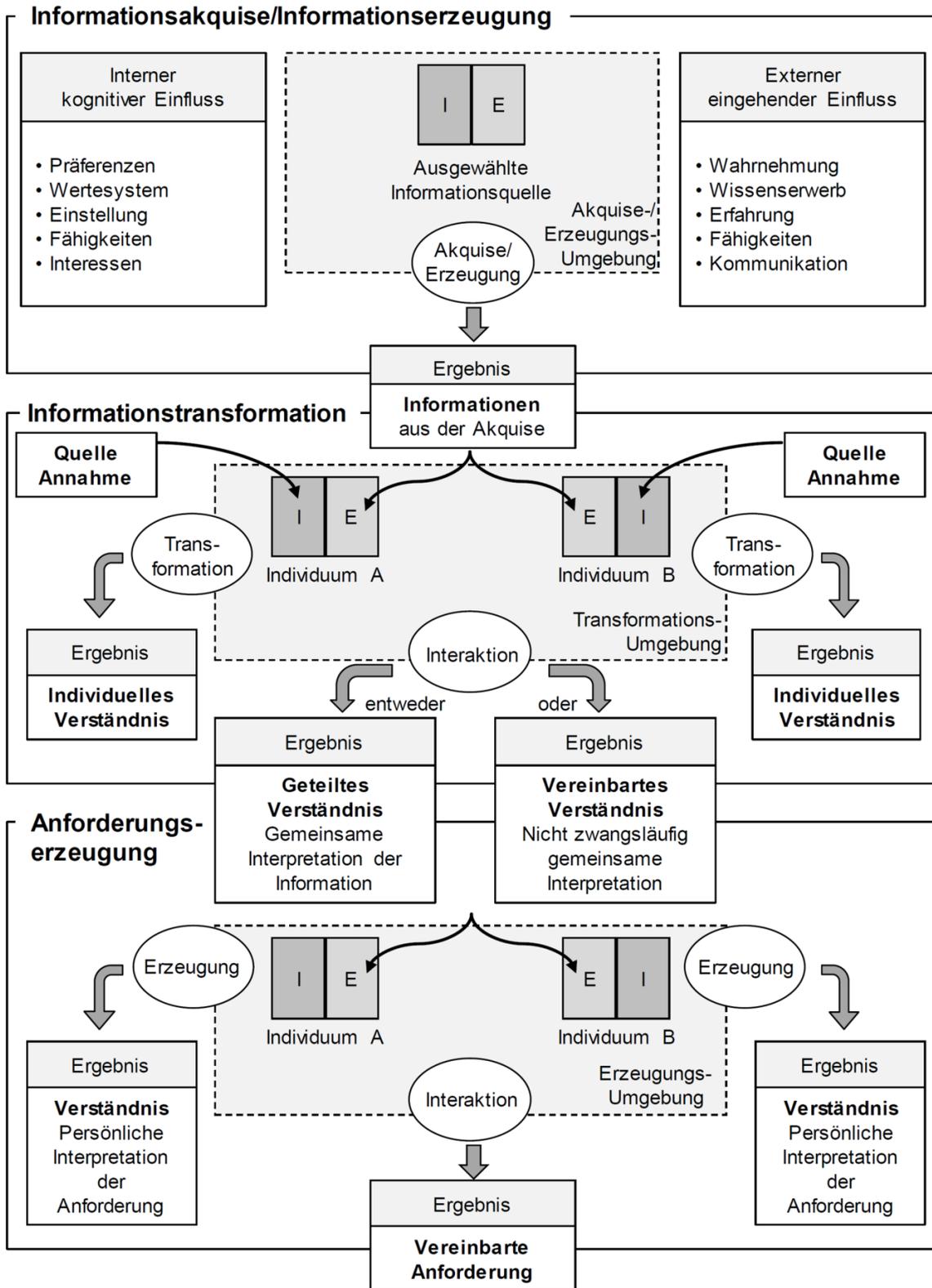


Abbildung 10: Prozessmodell theoretischer Anforderungserfassung nach COOPER ET AL.⁹¹

⁹¹ Aus Lohmeyer 2013, S. 45

Insbesondere bei der Delegation von Zielen – sei es durch einen hierarchisch übergeordneten Entscheidungsträger oder eine andere Unternehmenseinheit – ist auf die Operationalisierbarkeit von Zielen zu achten. Fehlende Operationalisierbarkeit führt nach LAUX ET AL. zu fehlenden Leitlinien für notwendige Entscheidungen, zu individueller Interpretation und Ableitung von subjektiven, gegebenenfalls verzerrten Unterzielen sowie zu der fehlenden Möglichkeit einer Zielerreichungsüberprüfung.⁹²

AHRENS⁹³ vergleicht verschiedene Ansätze zur Unterstützung der Anforderungsentwicklung. Hierfür legt sie Bewertungskriterien an, die in sechs Dimensionen aufgeteilt werden. Diese sind Kunde, Transformation, Konkretisierung, Handhabung, Wettbewerb, Flexibilität bei der Methodenauswahl⁹⁴. Für die vorliegende Arbeit bzw. die Anwendung im Kontext des Design to Energy Efficiency sind dabei die folgenden als positiv bewerteten Ausprägungen besonders interessant:

- Transformation: Ziele oder Kundenanforderungen müssen zunächst entsprechend der Intention des Kunden interpretiert und verstanden werden, bevor sie in technische Anforderungen übertragen werden können.
- Konkretisierung: Anforderungen, welche nur als „Wunsch“ definiert wurden, müssen hinsichtlich der Notwendigkeit ihrer Umsetzung differenziert werden.
- Handhabung: Der Ansatz ist grundsätzlich für eine IT-Unterstützung geeignet.
- Wettbewerb: Anforderungsgewicht und -erfüllung orientieren sich an existierenden Lösungen

Die vorgestellten Ansätze zur Ziel-, Anforderungs- und Zielsystementwicklung beschreiben primär die Erhöhung des Zielreifegrades⁹⁵ durch Zielkonkretisierung. Eine zuvor gegebenenfalls notwendige differenzierende Klärung der Zielabsicht zur Überführung des abstrakten Begriffs in den projektspezifischen Kontext ist dabei häufig prinzipiell eingeschlossen, wird jedoch nicht expliziert oder gar konkret unterstützt.

Die weitere Ergänzung und Verfeinerung von Anforderungen im Sinne einer kontinuierlichen Erweiterung und Konkretisierung des Zielsystems auf Basis der Analyse des Objektsystems liegt nicht im Fokus dieser Arbeit, weshalb hierzu auf andere Arbeiten, beispielsweise von AHRENS⁹⁶ oder LOHMEYER⁹⁷ verwiesen sei.

⁹² Vgl. Laux et al. 2012, S.49

⁹³ Ahrens 2000

⁹⁴ Ahrens 2000, S.118

⁹⁵ Zum Begriff des Zielreifegrades als eine Zieldimension vgl. Albers; Lohmeyer et al. 2011

⁹⁶ Vgl. Ahrens 2000

⁹⁷ Vgl. Lohmeyer 2013

2.2.3 Design for X und Design to X

Design to X (DtX) und Design for X (DfX) beschreiben eine Gruppe von Ansätzen zur Gestaltung nach sogenannten Gerechtheiten. Dabei unterstützen unterschiedliche Methoden – in erster Linie Richtlinien – wie technische Produkte bestimmten Aspekten späterer Produkteigenschaften oder Phasen des Produktlebenszyklus gerecht gestaltet werden können. Die DESIGN SOCIETY⁹⁸ differenziert die beiden Gruppen von Gestaltungsansätzen DfX und DtX ebenfalls nach dem Wesen des durch X beschriebenen zu berücksichtigenden Produktaspekts. So wird darauf verwiesen, dass das X im Fall der DfX-Ansätze für Lebenszyklusphasen⁹⁹, im Falle der DtX-Ansätze hingegen für Produkteigenschaften steht.

Die Entwicklung technischer Produkte beschränkt sich heute bei Weitem nicht mehr auf die reine Funktionserfüllung, sondern strebt ganzheitlich ausgerichtete Lösungen an, die einer Vielzahl unterschiedlicher Ziele und Anforderungen gerecht zu werden versuchen. In diesem Sinne begründen STÖBER ET AL. die Notwendigkeit des DfX-Ansatzes mit der zunehmenden Komplexität der Produktentstehung sowie den wachsenden Anforderungen beispielsweise von Kunde, Markt oder Gesetzgebung.¹⁰⁰ Dabei verstehen sie den DfX-Ansatz jedoch als „Wissenssystem [...], in welchem Erkenntnisse, wie einzelne Eigenschaften technischer Systeme beim Konstruieren zu erreichen sind, gesammelt und geordnet werden“¹⁰¹. Ein anderes Verständnis¹⁰² von DfX- und DtX-Ansätzen schließt unter anderem auch Methoden zur gezielten Berücksichtigung der einzelnen X mit ein, sodass der gesamte Ansatz eher als ein Handlungssystem zu verstehen ist.

Innerhalb der Entwicklungsmethodik gibt es divergente Interpretationen des eigentlichen Wesens des DfX. Einige Arbeiten¹⁰³ verstehen das X als die Gesamtheit aller zu berücksichtigenden Ziele und den Ansatz entsprechend als „...die Bestrebungen in der Produktentwicklung, die in den meisten Fällen widersprüchlichen Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt gleichzeitig zu berücksichtigen und den bestmöglichen Kompromiss zwischen ihnen zu finden.“¹⁰⁴ Andere¹⁰⁵

⁹⁸ Die Design Society versteht sich als internationale Organisation ohne Gewinnabsicht zur Förderung und Kommunikation aller Aspekte des Verständnisses im Kontext Design also Produktentwicklung und Produktentstehung. Vgl. Design Society 2014

⁹⁹ Im Sinne des iPeM auch Produktentstehungsaktivitäten

¹⁰⁰ Stöber; Faerber et al. 2007

¹⁰¹ Stöber; Faerber et al. 2007, S.33

¹⁰² Vgl. beispielsweise Tichem 1997, S.3

¹⁰³ Vgl. Stöber; Faerber et al. 2007, Tichem 1997, Meerkamm 2007

¹⁰⁴ Stoeber; Gruber et al., S.101

¹⁰⁵ Vgl. Bonvoisin; Mathieux et al. 2010

verstehen den DfX Ansatz als Mittel zur gezielten Berücksichtigung einzelner hervorgehobener Produktmerkmale (X), ohne dabei die Wechselwirkung mit den übrigen Zielen zu vernachlässigen.

Beide Sichtweisen verbindet der grundlegende Gedanke, die Methoden des DfX sollten den Produktentwickler bei der Entscheidungsfindung primär in den Produktentstehungsaktivitäten der Profilverfindung¹⁰⁶, der Ideenfindung sowie der Prinzip- und Gestaltmodellierung unterstützen. Werden Werkzeuge des DfX zur Fokussierung einzelner X verwendet, so ist die explizite Beschreibung des X in Literatur und Praxis üblich. Als bekannteste Beispiele hierfür seien Design for Manufacturing, Design for Assembly und Design to Costs genannt. Ansätze des Design to Energy Efficiency haben demnach die gezielte Fokussierung der energieeffizienten Eigenschaft von Produkten zum Ziel.

2.2.4 Zwischenfazit

Eine differenzierte Ziel- und Anforderungsformulierung sind zentrale Voraussetzungen für eine erfolgreiche Produktentstehung. Die Entwicklung von initialen Zielsystemen und deren Weiterentwicklung zu handhabbaren, verdichteten Zielen zur Beschreibung eines Nutzenprofils des zu entwickelnden Produkts legen nahezu alle zukünftigen lösungsneutralen Produkteigenschaften sowie den zu erwartenden Entwicklungsaufwand maßgeblich fest. Daher existieren u. a. mit den Methoden des Design for X und Design to X Ansätze, die den Entwickler bei Handhabung und Entscheidungsfindung unterstützen sollen. Insbesondere im Fall einer Priorisierung einzelner Zielaspekte wie im Design to Energy Efficiency muss jedoch eine differenzierte Betrachtung des zentralen Zielaspekts für eine geeignete Ziel- und Anforderungstransformation erfolgen.

2.3 Energieeffizienz

2.3.1 Begriff und Bedeutung

Der Begriff der Effizienz leitet sich ebenso wie der Begriff der Effektivität aus dem lateinischen Verb „efficere“ ab, das übersetzt „hervorbringen, erzeugen“ oder auch „zustande bringen, durchführen, bewirken“ bedeutet. Die Effektivität ist ein Maß für die Wirkung im Verhältnis zu den gesetzten Zielen, die Effizienz hingegen ein Maß für den wirtschaftlichen Einsatz des Aufwands zum Erreichen der Wirkung. Effizienz setzt also Effektivität voraus.¹⁰⁷

¹⁰⁶ Auch Produktplanung (vgl. Meerkamm 2007)

¹⁰⁷ Vgl. Pehnt 2010

Energieeffizienz ist zunächst als ein theoretisches Konstrukt zu betrachten, welches das Verhältnis zwischen einem zuvor definierten Nutzen und dem energetischen Aufwand zur Erreichung dieses Nutzens beschreibt. Somit ist die Energieeffizienz ein Indikator für den wirtschaftlichen Einsatz von Energie zum Erreichen eines Nutzens.¹⁰⁸ Die Begriffe Energie und Nutzen sind jedoch wiederum selbst theoretische Konstrukte, deren Bedeutungen nicht ohne eine terminologische Abgrenzung geklärt werden können.¹⁰⁹ Durch den Begriff der Energieeffizienz kann sowohl die effiziente Bereitstellung von Energie, als auch deren effiziente Speicherung, Umwandlung oder Nutzung beschrieben werden.

Der Begriff des energieeffizienten Produkts suggeriert nach PEHNT, dass dieses „den geforderten Nutzwert mit über den Lebenszyklus geringstmöglichem Energieaufwand erfüllt - unter Berücksichtigung der Konsequenzen für andere Umweltaspekte“¹¹⁰. Auf die Nutzungsphase eines Produktes übertragen bedeutet dies: Energieeffiziente Produkte sind Produkte, die den geforderten Nutzwert mit über die Nutzungsphase geringstmöglichem Energieaufwand erfüllen. Die ebenfalls genannte Berücksichtigung weiterer Umweltaspekte hat zwar im ursprünglichen Kontext des EcoDesign ihre Berechtigung, ist jedoch für die eigentliche Energieeffizienz tatsächlich nicht weiter relevant als die Berücksichtigung weiterer wechselwirkender Ziele, wie Kosten oder Komfort. Weiterhin ist die Energieeffizienz von den ihr nahestehenden Begriffen der Energiesuffizienz und -konsistenz abzugrenzen. Die Effizienz wird durch das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand beschrieben. Das Infragestellen des Nutzens beschreibt die Ansätze der Suffizienz. Das infrage stellen des Aufwands (woher kommt die Energie, die den Nutzen „ermöglicht“) hängt wiederum eng mit Ansätzen der Konsistenz zusammen.

Energiesuffizienz beschreibt den sparsamen Einsatz von Energie, gegebenenfalls unter Inkaufnahme einer Reduktion des Nutzens. Eine Steigerung der Energiesuffizienz setzt also eine Verhaltensänderung auf der Nachfrage- oder Verbraucherseite voraus. Der Ansatz der Energiesuffizienz zielt auf eine Begrenzung der eigenen Bedürfnisse, Konsumverzicht und daher auf die Frage ab, wie energieverbrauchsrelevante Bedarfe in unterschiedlichen Konsumfeldern verringert werden können. Beispiele für solche Bedarfe sind Flächen beheizter und beleuchteter Räume oder die Größe von Bildschirmen.¹¹¹ So ist beispielsweise kaltes Duschen energiesuffi-

¹⁰⁸ Vgl. Patterson 1996

¹⁰⁹ vgl. Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3

¹¹⁰ 2009/125/EU (2009)

¹¹¹ Vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2014

ziert, die Bereitstellung von Warmwasser mit verringertem Energieaufwand hingegen energieeffizient.

Energiekonsistenz fokussiert die geschlossene Führung von Stoffen und Energie in Wirtschaftskreisläufen sowie den Konsum nachhaltiger oder wiederverwertbarer Energieressourcen zur Befriedigung eines Energiebedarfs. Beispiele hierfür sind die Nutzung von Abwärme und Wiederverwendung von Brauchwasser. Die Umsetzung von Konsistenzstrategien bedarf neben technischen Anpassungen im Regelfall größerer organisatorischer Änderungen in der gesamten Wertschöpfungskette.¹¹²

Durch eine ausreichend hohe Abstraktion des Nutzens des zu entwickelnden Systems können jedoch Gedanken der Suffizienz durchaus Einzug in die Steigerungen der Energieeffizienz halten. So argumentiert auch PEHNT¹¹³, dass „eine Verlagerung einer Mobilitätsdienstleistung auf den öffentlichen, gut ausgelasteten Verkehr (...) zugleich eine Verhaltensänderung wie auch eine Effizienzerhöhung des Quotienten Energieeinsatz zu Mobilitätsbereitstellung“ ist. Dies ist neben technologischen Entwicklungssprüngen häufig Ursprung von größeren Effizienzsteigerungen.

Nach PEHNT¹¹⁴ kann Robert Mayer¹¹⁵ als Vater des Energieeffizienzgedankens betrachtet werden, da dieser die Erkenntnisse der Energieerhaltung zusammenfasste und daraus folgerte, dass es „eine unveränderliche Größenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit“ geben müsse und man für eine Optimierung kohlebetriebener Dampfmaschinen den unerwünschten Effekt der Verbrennung, also die Wärmeverluste, möglichst gering zu halten wären.

Kritik an einer Fokussierung der Energieeffizienz kommt primär von den Befürwortern einer ökologisch motivierten ganzheitlichen Nachhaltigkeit. So wird argumentiert, der Gedanke der Energieeffizienz stelle nicht ausreichend „das vorherrschende Wachstumsparadigma“ infrage¹¹⁶, oder verlange den notwendigen Verzicht von den Produkten, anstatt von den Anwendern selbst. Weiterhin wird häufig über den Rebound-Effekt argumentiert, welcher die (über-)Kompensation von mithilfe von Energieeffizienzsteigerungen erreichten Energieeinsparungen durch eine eben dadurch verursachte Mehrnutzung beschreibt.¹¹⁷ HUBER, ein Vertreter der

¹¹² Vgl. Koch; Zech 2011

¹¹³ Pehnt 2010, S.19

¹¹⁴ Pehnt 2010, S.20f

¹¹⁵ Julius Robert von Mayer (1814 – 1878), deutscher Arzt und Physiker, formulierte als einer der ersten den Ersten Hauptsatz der Thermodynamik

¹¹⁶ Paech 2006

¹¹⁷ Vgl. Herring und Roy 2007, Santarius 2012

Konsistenzstrategie, kritisiert das Sättigungsverhalten von Energieeffizienzsteigerungen, wonach die Effizienzsteigerungen bei einem Produkt in der Etablierungsphase in eine Sättigung laufe und somit ausgereizt seien.¹¹⁸

MÜLLER ET AL.¹¹⁹ fokussieren bei ihren Untersuchungen zur Energieeffizienz als Zielgröße zwar die Produktionsplanung, ihre wesentliche Einschätzung einer steigenden Berücksichtigung des Energieverbrauchs lässt sich jedoch auf die gesamte Produktentstehung übertragen, da wesentliche Ziele aktivitätenübergreifend betrachtet und verfolgt werden müssen um eine nachhaltige und umfassende Zielerreichung überhaupt zu ermöglichen. Nach Einschätzung von MÜLLER ET AL. ist die Relevanz des Energieverbrauchs und damit der Energieeffizienz von allen betrachteten Zielgrößen am stärksten gestiegen. Dies ist in der Darstellung zur Relevanzentwicklung ausgewählter Zielgrößen in der Automobilindustrie in Abbildung 11 ersichtlich.

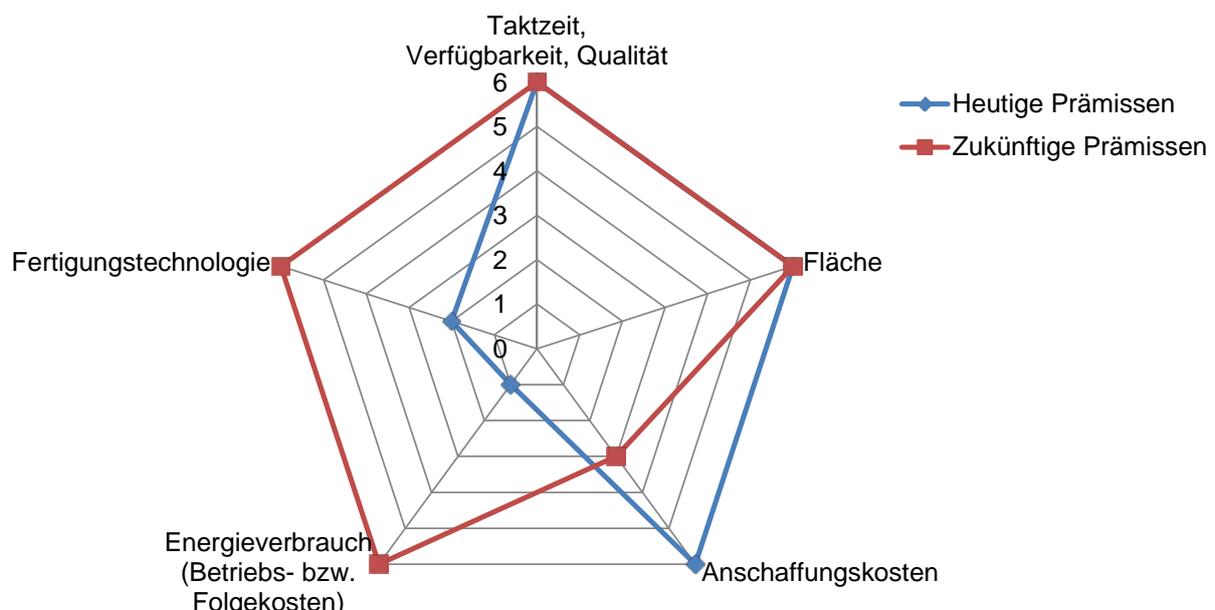


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung der Relevanz ausgewählter Zielgrößen in der Produktionsplanung der Automobilindustrie.¹²⁰

2.3.2 Energetischer Aufwand

Nach VDI 4661 ist die Energie „eine fundamentale physikalische Größe“, welche in unterschiedlichen Erscheinungsformen auftritt. Dabei unterscheidet die Norm zwei

¹¹⁸ Huber 2000

¹¹⁹ Müller et al. 2008

¹²⁰ Nach Müller et al. 2008, S.637

Klassen dieser Erscheinungsformen. Einerseits die Energie als Eigenschaft eines thermodynamischen Systems. „Bei diesen gespeicherten bzw. gebundenen Energien handelt es sich jeweils um Energiemengen pro Volumen-, Massen- oder Stoffmengeneinheit. Sie werden normalerweise nicht insgesamt quantifiziert, sondern als Differenz zu einem normierten Referenzzustand des betreffenden Systems dargestellt.“¹²¹ Die andere Klasse betrifft Wechselwirkungen zwischen Systemen beispielsweise in Form von Arbeit, Wärme oder elektromagnetischer Strahlung. Diese Energieformen werden „als eigentliche Träger äußerer Wirkung“ angesehen.¹²²

Die zentrale Bezugsgröße der Energieeffizienz ist der energetische Aufwand als Maß für die Energie, die zur Bereitstellung des Nutzens erforderlich ist. Umgangssprachlich bezeichnet der Energieverbrauch den zu erwartenden oder tatsächlich erfolgten Energiebedarf einer Anwendung. Der Bedarf ist ein unabhängig vom Nutzerverhalten errechneter theoretischer Wert. Der Verbrauch und auch der Aufwand definieren die tatsächlich aufgewendete Energiemenge, welche je nach Nutzerverhalten variieren.¹²³ Dabei ist der Begriff des Verbrauchs irreführend, da Energie nicht verbraucht werden kann. Nach dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik für ein offenes, instationäres System (Gl. 2.1) kann Energie nur zwischen Systemen in Form von Wärme (\dot{Q}_i), Arbeit (\dot{W}_j) oder energiebehafteten Masseströmen (Enthalpie $\dot{m}_k h_k$; potentielle Energie $\dot{m}_k a z_k$; kinetische Energie $\frac{1}{2} \dot{m}_k c_k^2$) ausgetauscht und von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden.

$$\frac{dES_{\text{sys}}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{W}_j + \sum_k \dot{m}_k \left(h_k + a z_k + \frac{1}{2} c_k^2 \right) - \sum_l \dot{m}_l \left(h_l + a z_l + \frac{1}{2} c_l^2 \right) \tag{Gl. 2.1}$$

Der Energieerhaltungssatz, als Grundlage für den ersten Hauptsatz der Thermodynamik, wurde von James Joule, Robert Mayer und Hermann Helmholtz unter unterschiedlichen Gesichtspunkten unabhängig voneinander erarbeitet.¹²⁴

Die Energie wird weder erzeugt noch vernichtet. In der Praxis wird dennoch häufig von Energieverlust, Energieverbrauch oder Energieverschwendung gesprochen.¹²⁵

¹²¹ VDI 4661 (2003), S.5

¹²² VDI 4661 (2003), S.6

¹²³ VDI 4661 (2003)

¹²⁴ Vgl. Pehnt 2010, S.20

Dies kann damit begründet werden, dass nur ein bestimmter Teil der in einem System vorhandenen Energie Arbeit verrichten kann. Dieser Teil der Energie wird Exergie genannt. Sie nimmt nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik (Gl. 2.2) bei der Umwandlung unterschiedlicher Energieformen in geschlossenen Systemen beständig ab, wohingegen die Entropie S_{Sys} beständig zunimmt oder idealerweise konstant bleibt.

$$dS_{\text{irr}} \geq 0; \text{ wobei } \frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{S}_{Q_i} + \sum_j \dot{m}_j s_j - \sum_k \dot{m}_k s_k + \sum_k \dot{S}_{\text{irr},k} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Energieverluste beschreiben jenen Anteil an Energie, der das System verlässt, ohne dabei dem Nutzen dieses Systems oder des Prozesses beizutragen. Die VDI 4661¹²⁶ definiert den Energiebedarf als die unter Einsatz einer dafür geeigneten Technik einzusetzende Endenergie, die unter definierten Randbedingungen zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung benötigt wird. Durch die Energie wird das Arbeitsvermögen eines Systems beschrieben. Zustandsänderungen in einem System sind nur unter Einsatz von Arbeit möglich. Arbeit bezeichnet dabei die Energie, die zwischen verschiedenen Systemen übertragen wird. Diese Zustandsänderungen sind Voraussetzung für die Funktionserfüllung der meisten technischen Systeme, sodass hierfür Energie benötigt wird. Energieumsetzungen wiederum führen zu den gewünschten Zustandsänderungen. Bei jedem Umsatz von Energie, als einem Wandel der in ein System eingehenden Energie in die Form der benötigten Nutzenergie am Systemausgang treten Verluste unterschiedlicher Ausprägungen auf.

Der energetische Aufwand zur Befriedigung eines Bedarfs ist ein wesentliches Merkmal zur Unterscheidung von Lösungen, selbst unter Abweichungen des tatsächlich realisierten Nutzens. Anhand der Verteilung des Auftretens des Energieaufwands über den Produktlebenszyklus lassen sich Produkte im Wesentlichen in zwei Gruppen unterteilen, welche eine praktische Relevanz für die Produktentwicklung haben: Die Vielzahl technischer Systeme zählt zu den sogenannten aktiven Produkten, welche den höchsten Energieaufwand während der Produktnutzungsphase zeigen.¹²⁷ Bei den passiven Produkten wiederum ist die Herstellung oder die vorangestellte Materialbereitstellung energetisch dominant. Eine

¹²⁵ Vgl. Löffler 2011

¹²⁶ VDI 4661 (2003)

¹²⁷ Vgl. Kaebernick et al. 2003 und Domingo; Evrard et al. 2011

Auswahl von Produkten beider Ausprägungen kann in Abbildung 12 unterschieden werden.

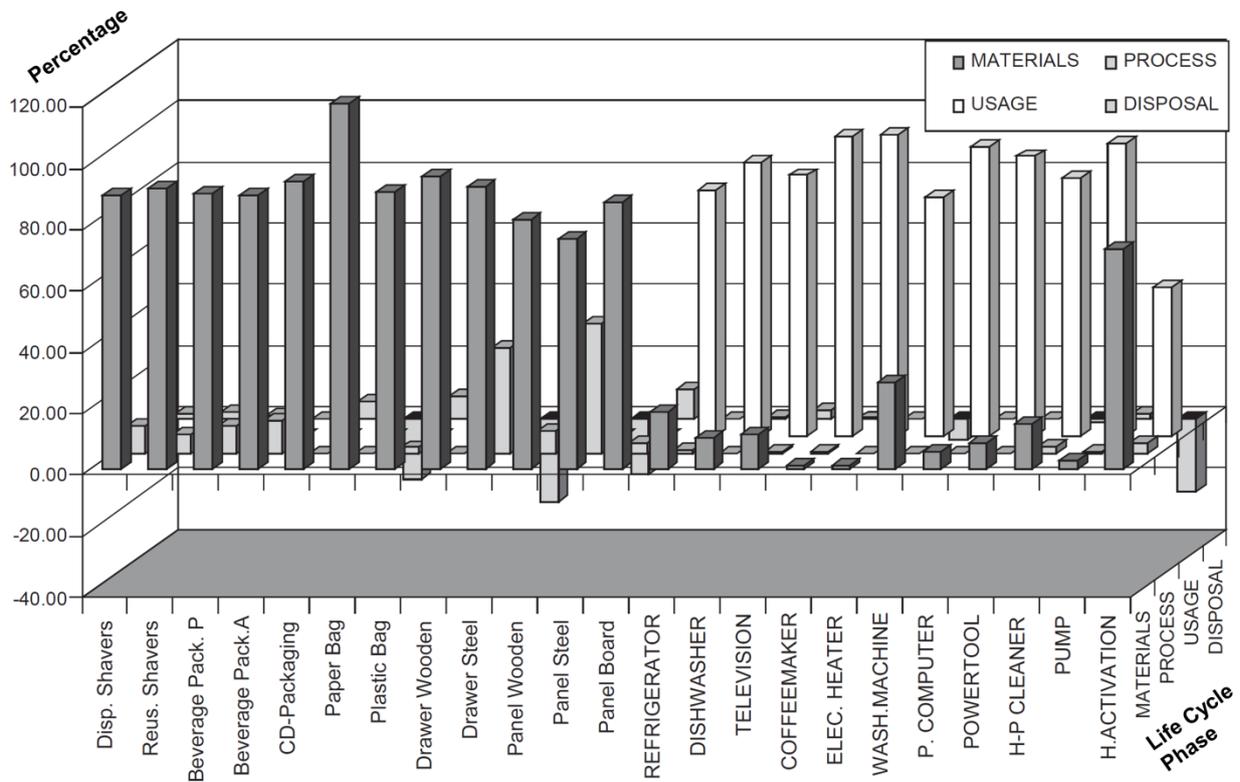


Abbildung 12: Verteilung eines energieaufwandsbasierten „environmental performance indicators“ über Lebenszyklusphasen unterschiedlicher Produkte.¹²⁸

Bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwands¹²⁹ wird „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands“ untersucht, „der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“¹³⁰

¹²⁸ Aus Kaebnick et al. 2003

¹²⁹ Vgl. Abschnitt 2.4.1

¹³⁰ VDI 4600 (2012)

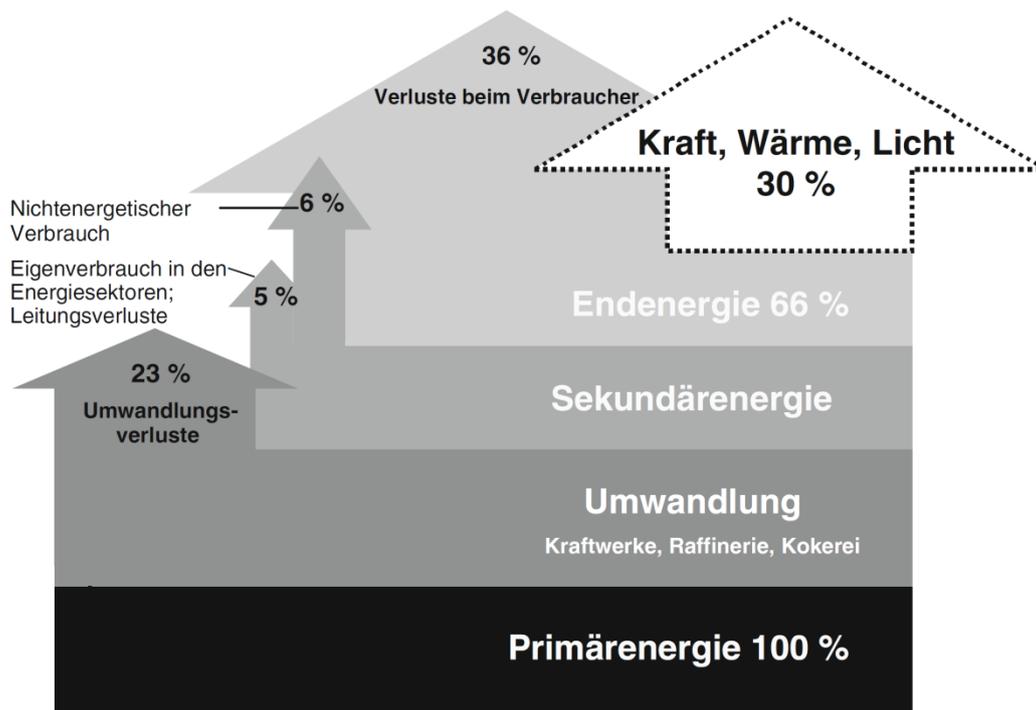


Abbildung 13: Energieanteile einer vereinfachten Energiebilanz in Deutschland.¹³¹

Primärenergie beschreibt dabei den rechnerischen Energiegehalt eines natürlich vorkommenden Energieträgers.¹³² Wie in Abbildung 13 dargestellt, wird die Primärenergie durch verlustbehaftete Prozesse in sogenannte Sekundärenergieträger umgewandelt. Dabei wird der nutzbare Energieanteil durch Umwandlungs- und Transportverluste reduziert. Bei der Transformation in dem Kunden zur Verfügung stehender Endenergie kommt es erneut zu Leitungs- oder Transportverlusten. Schließlich erfolgt die letzte Umwandlung beim Kunden in Nutzenergie.¹³³ Die Nutzenergie umfasst nach VDI 4608¹³⁴ die technischen Formen der Energie, die der Verbraucher benötigt, wie zum Beispiel Wärme, Licht oder mechanische Energie.

2.3.3 Nutzenbegriff und Nutzenbewertung

Nutzenbegriff

Der Nutzen kann als äquivalenter Begriff aus Sicht der Produktentwicklung zur Beschreibung einer beabsichtigten Wirkung, wie er der Definition der Energieeffizi-

¹³¹ Aus Pehnt 2010, S.22

¹³² Dies beinhaltet sowohl fossile, als auch erneuerbare Energieformen.

¹³³ Vgl. Pehnt 2010

¹³⁴ VDI 4608 (2008)

enz zugrunde liegt, betrachtet werden.¹³⁵ Der Nutzen wird unter anderem als ein Maß für die Fähigkeit eines Gutes verstanden, die Bedürfnisse einer wirtschaftlich handelnden Einheit (Person, Organisation, Gesellschaft, o.ä.) zu befriedigen.¹³⁶ Bei der Beschreibung der Energieeffizienz ist, im Gegensatz zum energetischen Wirkungsgrad¹³⁷, der Nutzen nicht zwangsläufig energetisch definiert. Dies hat zur Folge, dass eine Beschreibung des Nutzens so näher an einem tatsächlichen, kundenorientierten Nutzenprofil orientiert werden kann, die konsistente Quantifizierung und somit die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme jedoch erschwert wird.

MARTIN ET AL.¹³⁸ verwenden den durch ALBERS¹³⁹ definierten Begriff Nutzenprofil zur Beschreibung der Gesamtheit von im Rahmen der Profilverfindung erfassten Nutzenmerkmalen aus Kundensicht, und ergänzen damit das Produktprofil, welches im Wesentlichen durch die Gegebenheiten des Marktes bestimmt und beschrieben wird, um eine kundennutzenorientierte Sicht.

Die Schwierigkeit einer konsistenten und aussagekräftigen Formulierung und Quantifizierung des Nutzens in der Effizienzformulierung ist einer der Hauptgründe, weshalb eine Quantifizierung von Energieeffizienzzielen in der betrieblichen Praxis häufig nur in Form stark vereinfachter Kenngrößen, wie dem energetischen Wirkungsgrad erfolgt.¹⁴⁰ Dabei ist auch die Schwierigkeit einer Definition geeigneter Referenzzyklen ein zu berücksichtigendes Hindernis.¹⁴¹ Der Nutzen als Beschreibung des nützlichen Ergebnisses oder Outputs technischer Systeme und Prozesse ist eng verknüpft mit dem betriebswirtschaftlichen Begriff der Leistungsfähigkeit¹⁴², dessen Quantifizierung ebenfalls eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten¹⁴³ auch außerhalb der Produktentwicklung beschäftigt. Die Leistungsfähigkeit technischer Systeme ist also ein wesentlicher Bestandteil einer Effizienzbetrachtung. Nach NEELY ET AL. ist gerade jedoch die Effizienz neben der Effektivität wiederum eine der zwei Dimensionen zur messenden Beschreibung der Leistungsfähigkeit. Dies verdeutlicht ein grundlegendes Problem bei der Beschreibung des Nutzens im Kontext der Produktentstehung: Ist der Produktnutzen die Erfüllung einer technischen oder

¹³⁵ Vgl. Abschnitt 2.3.1

¹³⁶ Vgl. Deppert; Mielke et al. 2001 nach Wikipedia 2014

¹³⁷ Vgl. Abschnitt 2.5.3

¹³⁸ Martin; Albers et al. 2013

¹³⁹ Albers, 2013c

¹⁴⁰ Vgl. Patterson 1996 und Pehnt 2010

¹⁴¹ Vgl. Domingo; Brissaud et al. 2013

¹⁴² Aus dem Englischen „Performance“

¹⁴³ Vgl. Neely; Gregory et al. 2005

bisweilen soziotechnischen Funktion oder kann er immer betriebswirtschaftlich beispielsweise durch Dienstleistung oder Zeiteinsparung beschrieben werden?

PATTERSON¹⁴⁴ kritisiert hierbei die Leichtfertigkeit einer Verwendung des Nutzenbegriffs beispielsweise bei der Formulierung eines nützlichen energetischen Outputs im Sinne des energetischen Wirkungsgrades. Ebenso betont BOULDING es sei wichtig zu beachten, dass alle aussagekräftigen Effizienzkonzepte, welche auf rein thermodynamisch oder physikalisch formulierten Aufwänden und Nutzenaspekten beruhen, aus Sicht des Menschen nicht zwangsläufig ebenso aussagekräftig sind. Die Bedeutsamkeit eines Effizienzkonzepts beruhe vollständig auf der Aussagekraft, die dessen Input- und Outputgrößen im Sinne einer Bewertung durch den Menschen haben.¹⁴⁵

Nutzenbewertung

Eine quantifizierende Bewertung des Nutzens ist Teilgegenstand oder Ziel einiger bestehender Methoden. Dazu gehören beispielsweise das Quality Function Deployment (QFD), die Nutzwertanalyse¹⁴⁶, oder die Nutzwertberechnung im Zuge der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung.¹⁴⁷

Das Quality Function Deployment¹⁴⁸ basiert ursprünglich auf dem Gedanken der Qualitätssicherung durch Fokussierung tatsächlich kundenrelevanter Produktmerkmale. Es dient der Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten aus den wesentlichen Anforderungen, die durch die gezielte Integration von Kundenanforderungen in die Produktentwicklung identifiziert werden. Dabei können diejenigen Merkmale identifiziert werden, mit denen die funktionalen Anforderungen an das Produkt erfüllt werden.¹⁴⁹ Das QFD kann sehr vielseitig angewendet werden. So ist es gleichermaßen auf technische Prozesse, Dienstleistungen, Marketing- und Geschäftsstrategien und Ähnliches anwendbar.¹⁵⁰

Mithilfe mehrerer Matrizen werden verschiedene Produktmerkmale, -eigenschaften und -anforderungen einander gegenüber gestellt und bewertet. Die erste dieser Matrizen nach AKAO ist das so genannte House of Quality, in welchem die

¹⁴⁴ Vgl. Patterson 1996, S. 383

¹⁴⁵ Boulding 1981 nach Patterson 1996, S.383

¹⁴⁶ Die Nutzwertanalyse dient dem Ermitteln einer Rangfolge von Lösungsalternativen mittels differenzierter Bewertung der Lösungen unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungskriterien

¹⁴⁷ Vgl. Geldermann, 2008

¹⁴⁸ QFD wurde Mitte der 1960er Jahr von dem Japaner Yoji Akao entwickelt.

¹⁴⁹ Vgl. Lindemann 2009, S.298

¹⁵⁰ Lindemann 2009, S. 298

technischen Qualitäts- oder Nutzenmerkmale¹⁵¹ gewichteten Kundenanforderungen gegenübergestellt werden. Dieses bildet das zentrale Werkzeug des QFD. Somit wird das QFD bereits in der Produktplanungsphase eingesetzt.¹⁵² Darauf aufbauend können in weiteren Schritten und entsprechenden Matrizen beispielsweise die so gewichteten Nutzenmerkmale mit einzelnen Baugruppen und -teilen korreliert werden. Die QFD-Methodik und somit die Gesamtheit der so entstehenden Korrelationsmöglichkeiten, die viele unterschiedliche Teilprozesse des Produktentstehungsprozesses integriert¹⁵², kann in vier Stufen unterteilt werden, die in Abbildung 14 dargestellt sind.

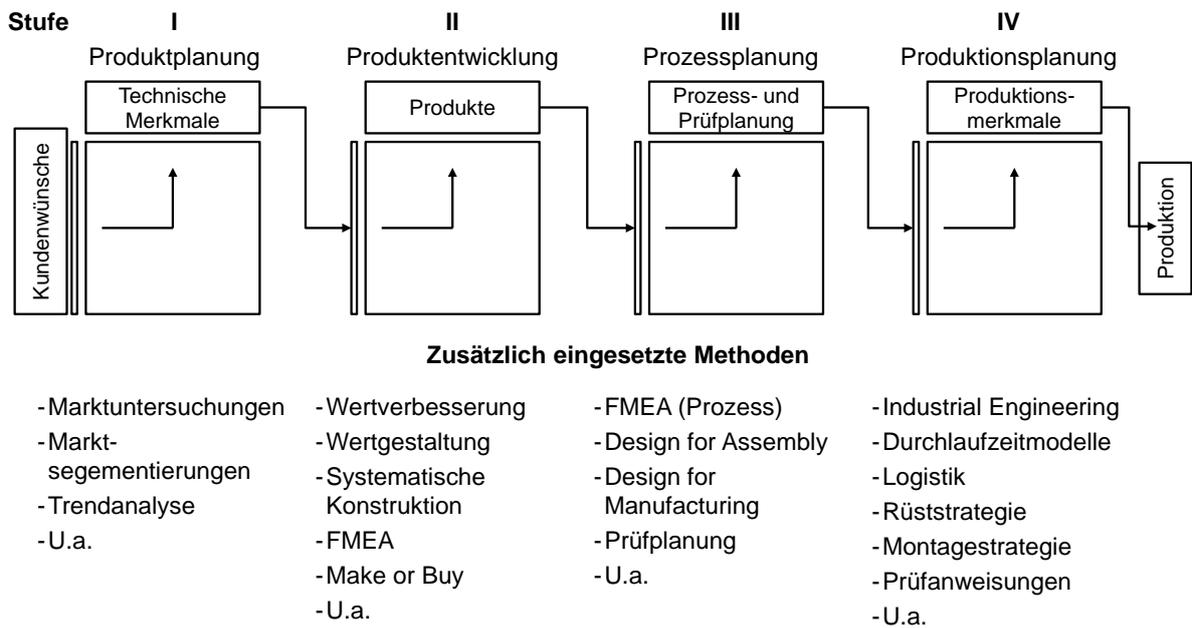


Abbildung 14: Die vier Stufen des QFD nach VDI 2247¹⁵³

Das House of Quality ermöglicht somit die anschauliche Berücksichtigung von Kundenanforderungen bei Auswahl und Priorisierung von Qualitätsmerkmalen oder Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts. Im „Dach“ des Hauses werden die ggf. konkurrierenden Wechselbeziehungen zwischen den Nutzenmerkmalen oder Zielforderungen untereinander bewertet. Im Mittelquadrat erfolgt eine Bewertung der Beziehungen zwischen den ggf. gewichteten Kundenanforderungen und Nutzenmerkmalen oder Zielforderungen. Zusätzlich können quantitative Zielwerte für die Nutzenmerkmale sowie eine gewichtete Bewertung der Nutzenmerkmale oder

¹⁵¹ Auch Zielvorgaben

¹⁵² Vgl. Pahl et al. 2007, S.705

¹⁵³ Aus Pahl et al. 2007 nach VDI 2247 (1994)

Zielforderungen eingetragen werden. Dieses grundsätzliche Vorgehen wird auch in den weiteren Schritten des QFD eingesetzt, wobei das vertikale „Wie?“ der vorhergehenden Matrix das horizontale „Was?“ der nachfolgenden ist.¹⁵⁴

Bei der Nutzwertanalyse nach ZANGEMEISTER werden die Ziele als Bewertungskriterien hierarchisch geordnet in eine Baumstruktur eingetragen. Hierbei stellt das in der Hierarchie ganz oben stehende Ziel den Gebrauchswert des Produktes dar, welcher allen anderen Zielen übergeordnet ist. Es folgt eine baumartige Verzweigung nach unten, in welcher die Bewertungsziele nach zusammengehörenden Eigenschaften weiter in Gruppen unterteilt werden. Die Teilziele in der letzten hierarchischen Ebene dieses von ZANGEMEISTER als Zielsystem bezeichneten Konstrukts werden Zielkriterien genannt und entsprechen konkreten Anforderungen.¹⁵⁵

Die Wichtigkeit der einzelnen Ziele wird durch zwei Faktoren gegeben, die in Abbildung 15 jeweils in der unteren Hälfte der Zielkreise angeführt werden: das Knotengewicht g_k (links) und das Stufengewicht g_s (rechts).

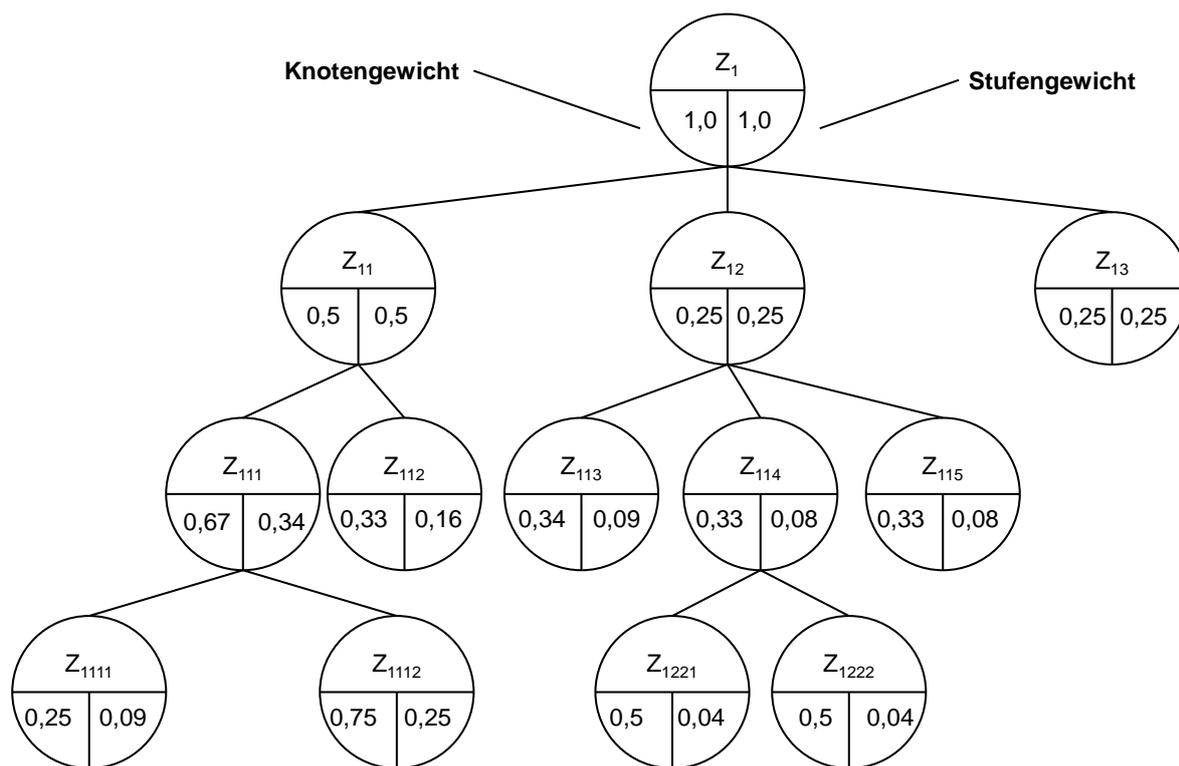


Abbildung 15: Hierarchische Struktur von Zielen, Teilzielen und Anforderungen mit jeweiliger Gewichtung.¹⁵⁶

¹⁵⁴ Vgl. Pahl et al. 2007, S.705f

¹⁵⁵ Vgl. Zangemeister 1976

¹⁵⁶ Nach Höfner 2002, S.17; Vgl. auch Kriterienbaum bei Geldermann, 2008, S.9

Das Knotengewicht bewertet die Wichtigkeit der jeweiligen Ziele einer Zielstufe in Bezug auf das Ziel, das eine Stufe höher im Zielsystem angeordnet ist. Es wird durch subjektive oder intersubjektive Bewertung festgelegt. Das Stufengewicht gibt die absolute Wichtigkeit eines Zieles in einer Zielstufe an. Es ergibt sich durch Multiplikation des jeweiligen Knotengewichts mit den hierarchisch übergeordneten Knotengewichten. Die Summe aller Knotengewichte einer Zielstufe ist eins.

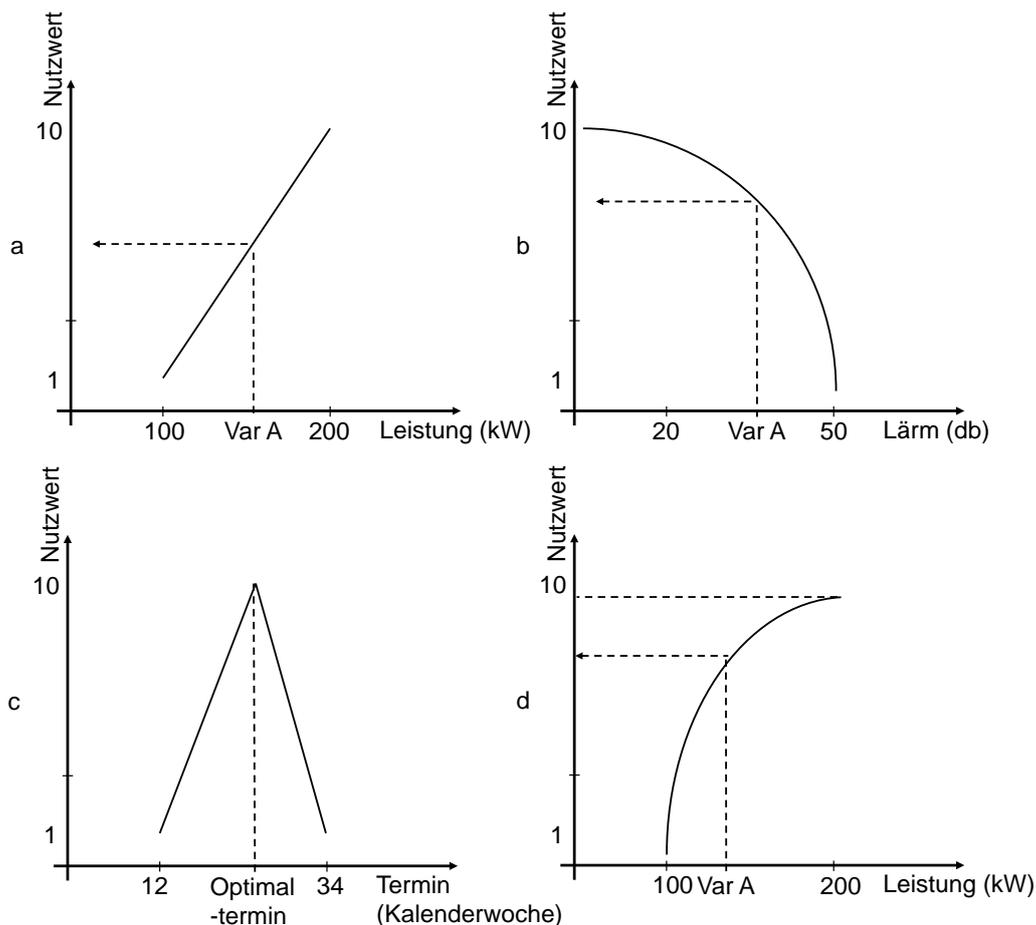


Abbildung 16: Darstellung verschiedener Verläufe von Nutzenfunktionen nach HABERFELLNER ET AL.¹⁵⁷

Im Systems Engineering nach HABERFELLNER ET AL. werden zur Ermittlung der Teilerfüllung zunächst die Teilziele in Messskalen dargestellt. Anschließend kann die Erfüllung der angestrebten Teilziele in Nutzenfunktionen abgebildet werden (Abbildung 16). Dies hat „den Zweck, die eigenen Wertvorstellungen für sich und andere transparent und damit diskutierbar zu machen“¹⁵⁸ Außerdem wird der

¹⁵⁷ Nach Haberfellner et al. 2012, S. 282

¹⁵⁸ Vgl. Haberfellner et al. 2012, S. 282

Entwickler so gezwungen, sich mehr problemorientiert als lösungsorientiert mit den zugrunde liegenden Zielen auseinanderzusetzen.¹⁵⁹

Mithilfe von Skalierungsmatrizen kann auch die Transformation von Ausprägungen in Notenskalen, die nicht in Kardinal- sondern in Nominal und Ordinalskalen abgebildet werden, unterstützt werden. So kann die Skalierungsmatrix die grafischen Nutzenfunktionen ersetzen oder ergänzen.

Die Conjoint-Analyse¹⁶⁰ dient einer Dekomposition von Präferenzbeurteilungen des Kunden in der empirischen Marktforschung beziehungsweise der Identifikation von Präferenzen für multiattributive Objekte. Ihr liegt dabei der Ansatz zugrunde, dass jedes Produkt (bzw. Dienstleistung) durch eine Kombination von (Nutzen-) Merkmalsausprägungen besteht, wobei angenommen wird, dass sich der Gesamtnutzen additiv aus den mit den einzelnen Eigenschaften verbundenen Teilnutzenwerten zusammensetzt. Für eine zielführende Entscheidungsfindung und Zielpriorisierung in der Produktentwicklung ist es von Interesse nachvollziehen oder sogar antizipieren zu können, wie der Kunde die Nutzenmerkmale bei einer Kaufentscheidung relativ zueinander gewichtet.

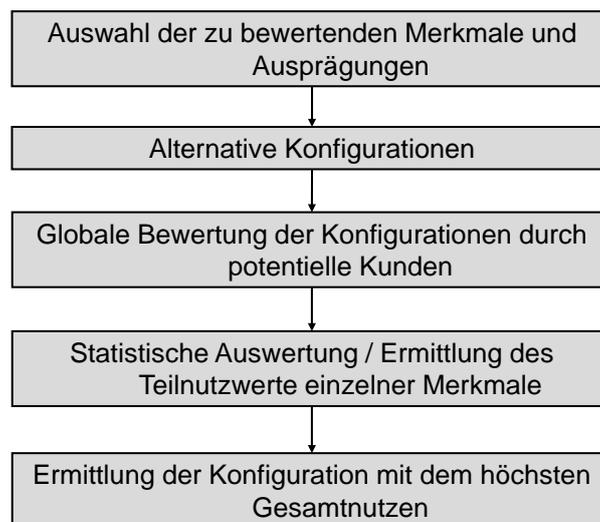


Abbildung 17: Vereinfachter schematischer Ablauf der Conjoint Analyse.¹⁶¹

Dies geschieht durch globale Beurteilungen verschiedener theoretischer Merkmalskombinationen, was nach ALBERS¹⁶² der realen Produktbeurteilung bei Kaufhandlungen nahe kommt. Basierend darauf werden die Beiträge der

¹⁵⁹ Vgl. Haberfellner et al. 2012, S.283

¹⁶⁰ Auch Trade-Off-Analyse oder Verbundmessung

¹⁶¹ Nach Albers 2014d

¹⁶² Albers 2014d

verschiedenen Nutzenmerkmale mittels multiattributiver Präferenzstrukturmodelle zum subjektiv empfundenen Gesamtnutzen des Produkts bestimmt.¹⁶³ So kann in der Produktentwicklung die Konfiguration mit dem höchsten Gesamtnutzen angestrebt werden (Vgl. Abbildung 17).

2.3.4 Zwischenfazit

Die Betrachtung der Energieeffizienz in ihrer Rolle als Zielgröße in der Produktentwicklung verdeutlicht die Problematik ihres abstrakten und generischen Charakters und die damit begründeten heterogenen Interpretationsmöglichkeiten. Dabei fehlt es an methodischer Unterstützung zur differenzierten und objektivierten Betrachtung der projektspezifischen Bedeutung der Energieeffizienz.

Diese Problematik erweitert sich um die Schwierigkeit einer Quantifizierung des Nutzenanteils in der Effizienzbetrachtung. Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Unterstützung einer Gewichtung in der Nutzenquantifizierung bietet beispielsweise der QFD-Ansatz, welcher neben der Zuordnung von Nutzenmerkmalen zu Kundenanforderungen, auch eine Zuordnung von bewerteten Nutzenmerkmalen zu einzelnen Teilsystemen ermöglicht. Die hierarchische Strukturierung von Zielen bildet eine Grundlage für die Bewertung von den Zielen zuzuordnenden Nutzenaspekten, wobei beispielsweise die Conjoint-Analyse eine kundenorientierte Gewichtung der Nutzenmerkmale ermöglicht. Die Darstellung von Nutzenfunktionen bietet eine transparente Art der quantifizierenden Bewertung des Nutzens über der Produktausprägung. Dennoch fehlt es an durchgängigen Ansätzen, welche diese Möglichkeiten für eine quantifizierende Beschreibung des Produktnutzens aufgreifen und zusammenführen. Gerade eine solche Quantifizierung ist jedoch für eine objektivierete Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentstehung notwendig.

2.4 Design to Energy Efficiency

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, fokussiert das Design to Energy Efficiency die energieeffiziente Eigenschaft von Produkten. REICHEL ET AL. verwenden hierfür auch den Begriff der energiesensitiven Produktgestaltung, welcher die fokussierte Berücksichtigung der energetischen Eigenschaften des Produkts betont. So hat auch die energiesensitive Produktgestaltung eine Steigerung der Energieeffizienz als maßgebliches Ziel und Bewertungskriterium im Entwicklungsprozess zum Gegenstand.¹⁶⁴

¹⁶³ Vgl. Klein 2009

¹⁶⁴ Vgl. Reichel; Rüniger et al. 2010

Im Kontext des Design to Energy Efficiency existiert eine Vielzahl von Methoden und Werkzeugen, die eine Unterstützung der Entwicklung energieeffizienter Produkte zum Ziel haben. Da die Energieeffizienz jedoch nicht nur Zielgröße, sondern auch Eigenschaft ist, ist streng genommen jedes energieumsetzende Produkt auch bereits energieeffizient, nur eben in unterschiedlichem Maße. Demnach haben die Methoden des Design to Energy Efficiency eigentlich insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz von zu entwickelnden Produkten zum Ziel. Dennoch wird aus Gründen der Verständlichkeit auch im weiteren Verlauf der Arbeit von der Entwicklung energieeffizienter Produkte gesprochen.

Die bestehenden Methoden des Design to Energy Efficiency lassen sich grob in drei Gruppen unterteilen: Die **eindimensional motivierten Methoden** (Abschnitt 2.4.1) orientieren sich tendenziell an einzelnen Sichtweisen auf die Energieeffizienz und entsprechend fokussierten Maßnahmen. Hierzu können Ansätze aus den Bereichen EcoDesign und Design for Environment, Design for Sustainability oder Methoden der rein ökonomischen Betrachtung von Energieeffizienzsteigerungen gezählt werden. Die Gruppe der **generischen Methoden** (Abschnitt 2.4.2) hat den Anspruch produktunabhängiger Anwendbarkeit zur Steigerung der Energieeffizienz, meist jedoch ohne dabei gezielt unterschiedliche der Entwicklungsaufgabe zugrunde liegende Motive differenziert zu unterscheiden und zu berücksichtigen. Die jeweilige tatsächliche produkt- oder nutzenprofilspezifische Zielbedeutung der Energieeffizienz wird somit meist vernachlässigt. Die dritte Gruppe umfasst die weitaus größte Zahl an methodischen Ansätzen, entsprechenden wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen. Sie umfasst all jene **produktspezifischen Methoden**, welche eine Steigerung der Energieeffizienz spezifischer Produktsysteme (bspw. Verbrennungsmotoren) oder Produktgruppen (bspw. mobile elektronische Geräte)¹⁶⁵ zum Gegenstand haben. Diese werden aufgrund ihrer sehr spezifischen Ausrichtung und der damit bereits gegebenen Vernachlässigung einer abstrakten generischen Berücksichtigung unterschiedlicher Energieeffizienzbedeutungen im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Allgemeine forschungsrelevante Fragen zur Energieeffizienz, ihrer spezifischen Bedeutung sowie der Identifikation und Formulierung geeigneter Zielgrößen werden bisher primär in einem politischen oder makroökonomischen Kontext diskutiert.¹⁶⁶ Dabei sind eben jene Aspekte und ein dadurch ermöglichtes differenziertes Verständnis der Energieeffizienz, auch in der Produktentwicklung für die jeweilige

¹⁶⁵ Vgl. Diehl; van Gennip et al. 2006, Grabowski 2009, Pirker 2008, Rüniger et al. 2011, Simunic 2001

¹⁶⁶ Goldmann; Schellens 1995

Fragestellung von zunehmender Bedeutung. Insbesondere die Auswahl geeigneter Methoden zur Unterstützung einer gezielten Steigerung der Energieeffizienz sollte auf Grundlage eines differenzierten und projektspezifischen Zielverständnisses geschehen.

Daher wird der Stand der Forschung in diesem Abschnitt insbesondere unter dem Gesichtspunkt einer Unterstützung der differenzierten Verwendung und Relevanzbewertung der Zielgröße Energieeffizienz untersucht.

Dabei bestätigen auch empirische Untersuchungen, dass Energieeffizienz noch nicht ausreichend im Planungsfokus steht. Nach MÜLLER ET AL. fehlt es derzeit „sowohl in der industriellen Praxis als auch in Forschung und Lehre an methodischer Unterstützung und Instrumentarien, mit denen richtungssicher und wirksam auf energieeffiziente Lösung gelenkt wird.“¹⁶⁷ Insbesondere die genannten Aspekte mangelnder Richtungssicherheit und Wirksamkeit des Strebens nach energieeffizienten Lösungen, können teilweise mit der undifferenzierten Verwendung der Zielgröße Energieeffizienz erklärt werden.

2.4.1 Eindimensional motivierte Methoden

Life Cycle Assessment

Das Life Cycle Assessment (LCA)¹⁶⁸ ist die wohl bekannteste Methode, die im Kontext des Ecodesigns eingesetzt wird, um eine Entwicklung umweltverträglicher Produkte zu unterstützen und nachzuweisen. Um die Energieeffizienz aus ökologischer Sicht nachhaltig steigern zu können, bedarf es einer solchen den gesamten Produktlebenszyklus berücksichtigenden Methode. Mithilfe des Life Cycle Assessments lassen sich die mit einem Produkt oder Prozess assoziierten Umweltauswirkungen bewerten und abwägen. Dies geschieht indem die ökologisch kritischen Parameter des Bilanzierungsobjekts (beispielsweise Energieströme, Materialflüsse oder weitere ökologische Effekte, wie der Ausstoß von Emissionen) aus deren Variation eine signifikante Umweltauswirkung folgt, in allen Phasen des Produktlebenszyklus identifiziert und anschließend quantifiziert werden. Diese Vorgehensweise soll dabei helfen, Produkte zu entwickeln, deren Nutzen mit den daraus resultierenden Umweltauswirkungen in einem möglichst optimalen Verhältnis steht. Die Energieeffizienz ist dabei nur eine mögliche von vielen Untersuchungskriterien.

¹⁶⁷ Müller et al. 2008, S.639 zu Untersuchungen in der Anlagenentwicklung

¹⁶⁸ Im Deutschen sind die Begriffe Lebenszyklusanalyse und Ökobilanz gebräuchlich.

Von den Anfängen des LCA an stand die quantitative Erfassung von Rohmaterialien, Energiebedarf, Emissionen und Abfallbeseitigung im Vordergrund. In den internationalen Normen DIN ISO 14040 ff¹⁶⁹ ist der Ablauf der LCA beschrieben. Ebenfalls enthalten sind die beiden folgenden kurzen Definitionen der Methode:

„Die Ökobilanz (...) ist eine international standardisierte Methode zur Analyse der Umweltverträglichkeit von Produktsystemen.“¹⁷⁰ und „Die Ökobilanz ist die Zusammenstellung und Beurteilung der Input und Output Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs.“¹⁷¹

Der Ablauf eines Life Cycle Assessments lässt sich nach DIN ISO 14040¹⁷² in die vier Elemente *Zieldefinition*, *Sachbilanz*, *Wirkungsabschätzung* und *Auswertung* gliedern, wobei alle vier Elemente wechselwirkende Beziehungen zueinander haben. Diese deuten an, dass es sich bei der Erstellung einer Ökobilanz um einen iterativen Prozess handelt, der mitunter ein Wiederholen von vorgelagerten Schritten notwendig macht.

Die Energieeffizienz ist im Life Cycle Assessment nur eine von vielen Verhältnisgrößen aus Ressourceneinsatz und der im Rahmen der Zieldefinition festgelegten funktionellen Einheit. Einige Ansätze zur Umsetzung des Life Cycle Assessments¹⁷³ sehen zwar eine Gewichtung der Wirkungskategorien vor und bieten so prinzipiell die Möglichkeit energieeffizienzrelevante Aspekte höher zu gewichten, eine tatsächliche Fokussierung der Energieeffizienz ist jedoch auch auf diesem Weg nicht vorgesehen und nicht zielführend.

Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand hat die Erfassung und Bewertung des primärenergetischen Energiebedarfs eines Produktes über dessen gesamten Lebenszyklus zum Ziel. Die Methode wurde in den frühen 1990er Jahren entwickelt.¹⁷⁴ Im Gegensatz zur wissenschaftlich anerkannten Methodik des Life Cycle Assessments, ist diese Kurzbilanzierungsmethode jedoch wissenschaftlich umstritten, da ihr die Annahme zugrunde liegt, dass bereits die Höhe des Primärenergieaufwands ein aussagekräftiger Indikator für die gesamten das untersuchte System betreffenden Umweltaspekte ist. Dabei werden jedoch lediglich der Primärenergiebedarf eines Produkts und keine

¹⁶⁹ DIN ISO 14040 (2006)

¹⁷⁰ Vgl. DIN ISO 14040 (2006),

¹⁷¹ Vgl. DIN ISO 14044 (2006)

¹⁷² DIN ISO 14040 (2006)

¹⁷³ Vgl. Konrad 2002

¹⁷⁴ Guenther 2014

weiteren Größen berücksichtigt, die mit ökologischen Auswirkungen in Verbindung gebracht werden müssten.¹⁷⁵ Außerdem werden sehr verschiedenen Wirkungsaspekte unterschiedlicher Primärenergien nicht berücksichtigt. So verlieren die Aussagen zu den ökologischen Auswirkungen durch die Aggregation aller Primärenergien an Schärfe und Transparenz. Beispielsweise werden die Primärenergieträger Uran und Kohle gleichwertig behandelt wie der Einsatz von Solarenergie, obwohl die jeweiligen Umweltwirkungen sehr verschieden sind, was die Richtungssicherheit und Aussagekraft dieses Indikators für viele infrage stellt, da etwa die verstärkte Nutzung regenerativer Energien aufgrund ihres hohen KEA-Werts wenig attraktiv erscheint.¹⁷⁶ Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands wird in der VDI 4600¹⁷⁷ beschrieben und berechnet sich nach:

$$KEA = \sum_{i=1}^l \left(\frac{Ee_i}{b_i} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{NEV_j}{b_j} \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{SEI_k}{b_k} \right) \quad \text{Gl. 2.3}$$

Der Kumulierte Energieaufwand setzt sich aus der Summe aller Einzelbestandteile des Endenergieaufwands (Ee), des nichtenergetischen Aufwands (NEV) und des stoffgebundenen Energieinhalts (SEI) zusammen, jeweils bereinigt um den Bereitstellungsnutzungsgrad (b) (vgl. Gl. 2.3). Als Bilanzierungszeitraum muss hierbei nach ERDMANN UND ZWEIFEL der gesamte Produktlebenszyklus angewandt werden. Die Berechnung auf Grundlage einer Prozesskettenanalyse ist dabei relativ einfach anzuwenden, wenn die notwendigen Daten zur Verfügung stehen. In der Praxis lässt sie sich jedoch aufgrund der häufig komplexen wirtschaftlichen wechselseitigen Abhängigkeiten, nur bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad durchführen und wird anschließend abgebrochen.¹⁷⁸

Somit bietet der kumulierte Energieaufwand eine relativ einfach zu handhabende Kennzahl, die durch die Abbildung aller verknüpfter Primärenergieflüsse zumindest eine grobe Aussage zu dessen ökologischer Wirkung geben kann. Aufgrund des deutlich geringeren Erstellungsaufwands in der praktischen Umsetzung wird er häufig einem Life Cycle Assessment vorgezogen, wobei die so ermittelten Aussagen entsprechend vereinfacht und hinsichtlich der Wirkungsaspekte pauschalisiert sind.¹⁷⁹

¹⁷⁵ Vgl. Abele et al. 2008

¹⁷⁶ Vgl. Fritsche; Jenseit et al. 1999

¹⁷⁷ VDI 4600 (2012)

¹⁷⁸ Vgl. Erdmann und Zweifel 2008

¹⁷⁹ Vgl. Stadler 2012 (betreute Abschlussarbeit)

Für die Ermittlung und Bewertung der ökologisch fokussierten Energieeffizienz eines Systems spielt der kumulierte Energieaufwand eine wichtige Rolle, da er Herstellung und Transport zuzurechnende Energieverluste vollständig berücksichtigt, allerdings nur auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene. Außerdem stellt die Berechnung des kumulierten Energieaufwands einen analytischen Ansatz dar, durch den sich zwar einzelne Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich ihrer Energieeffizienz vergleichen, nicht aber die Ziele energieeffizienter Produktsysteme sinnvoll und differenziert formulieren lassen.

Gruppieren von rechtlichen Energieeffizienzanforderungen

RATH ET AL. entwickeln ein Verfahren zum Clustern von Anforderungen bezüglich der Energieeffizienz eines Produkts, welches auf einem Gruppierungsverfahren basiert, das sich wiederum an ein unabhängig vom Energieeffizienzgedanken entwickelten Ansatz nach RÖDER ET AL. anlehnt.¹⁸⁰ Dabei werden jedoch nur Energieeffizienzanforderungen berücksichtigt, welche auf gesetzlichen Anforderungen und Randbedingungen sowie Energieeffizienz-Labeln begründet sind. Damit adressieren RATH ET AL. als eine der wenigen die Notwendigkeit einer Unterstützung des Produktentwicklers bereits bei der Erfassung und Handhabung der Ziele und Anforderungen bezüglich der Energieeffizienz. Da sich die Veröffentlichung zu diesem Ansatz¹⁸⁰ jedoch auf eine sehr beschränkte Menge von Anforderungen bezieht, bietet auch dieser keine umfassende und motivunabhängige Unterstützung.

2.4.2 Generische Methoden

Liegen einer beabsichtigten Steigerung der Energieeffizienz beispielsweise technische, funktionale oder betriebskostenbezogene Motive zugrunde, so ist es häufig ausreichend, die Energieeffizienz in der Produktnutzungsphase zu fokussieren. Für eine tatsächliche Steigerung der Energieeffizienz sind hierfür in der Regel produkt- und technologiespezifische Betrachtungen notwendig. Es existiert jedoch eine Reihe von generischen Methoden mit dem Anspruch produktunabhängige Unterstützung der Energieeffizienzsteigerung bereit zu stellen. Eine Auswahl dieser Methoden wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Gestaltungsrichtlinien

Die Berücksichtigung unterschiedlicher Gestaltungsrichtlinien zusätzlich zu den Grundregelnd der Gestaltung¹⁸¹ kann in der theoretischen wie praktischen

¹⁸⁰ Vgl. Rath; Röder et al. 2012b

¹⁸¹ Vgl. Pahl et al. 2007, S. 393

Produktentwicklung als etabliert betrachtet werden. Diese Gestaltungsrichtlinien werden häufig unter dem Begriff des Design for X zusammengefasst.¹⁸² Im Folgenden werden ausgewählte Richtlinien vorgestellt, die zu einer Gestaltung energieeffizienter Produkte beitragen sollen.

TELENKO UND SEEPERSAD¹⁸³ suchen und entwickeln neue umweltbewusste¹⁸⁴ Gestaltungsrichtlinien, indem sie Life Cycle Assessment und Reverse Engineering kombinieren. Auf diesem Wege identifizieren sie die – in diesem Fall energetisch dominierten – Schwachstellen eines Produktsystems und schlagen zu den darauf basierenden Anforderungen entsprechende Richtlinien vor. Die so entwickelten fünf exemplarischen Gestaltungsrichtlinien haben allesamt eine Steigerung der Energieeffizienz zum Ziel. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Richtlinien „Trennung von Funktionen mit konfliktbehafteten Lösungen“¹⁸⁵ und „Benachrichtigung des Anwenders bei Beendigung des Vorgangs“¹⁸⁶ genannt.

RATH ET AL.¹⁸⁷ entwickeln ein Werkzeug, welches Auffinden und Auswahl geeigneter Gestaltungsrichtlinien zur Steigerung der Energieeffizienz unterstützen soll. Mithilfe des Werkzeugs sollen Richtlinien zur Energieaufwandssenkung gezielt verfügbar gemacht werden. Mittels einer hierarchischen Struktur und einer Gruppierung der Gestaltungsrichtlinien nach Produktlebenszyklusphasen (Materialbearbeitung, Produktion, Produktnutzung, Produktrecycling/-entsorgung) und beabsichtigten „energetischen Hebeln“¹⁸⁸ soll das Auffinden erleichtert werden. Die energetischen Hebel sind mit den jeweiligen Unterzielen verknüpft und umfassen:

- Reduktion des Bedarfs an nützlicher Energie
- Verbesserung des Wirkungsgrads
- Rückgewinnung von Energie
- Verbesserung des Primärenergiegleichgewichts durch Wahl der Energiequelle

Basierend auf der Auswahl von Lebenszyklusphase und energetischem Hebel werden Maßnahmen-Cluster wie beispielsweise eine „Verringerung von (Energie) Verlusten“ empfohlen. Dieser Ansatz ermöglicht also nicht nur, sondern unterstützt gezielt, eine Fokussierung einzelner Produktlebenszyklusphasen. Dieser Aspekt der Herangehensweise ist vergleichsweise differenziert, die Richtlinien dagegen

¹⁸² Vgl. Abschnitt 2.2.3

¹⁸³ Telenko und Seepersad 2010

¹⁸⁴ Aus dem Englischen „environmentally conscious“

¹⁸⁵ Aus dem Englischen „Separate functions with conflicting solutions“

¹⁸⁶ Aus dem Englischen „Notify the user when operations are finished“

¹⁸⁷ Vgl. Rath; Birkhofer et al. 2011a

¹⁸⁸ Aus dem Englischen „energetic levers“

naturgemäß undifferenziert generisch. Die Kenntnis der betroffenen und zu fokussierenden Lebenszyklusphase wird hierbei als bekannt vorausgesetzt. Die Auswahl der sogenannten energetischen Hebel setzt ebenfalls eine bekannte Steigerungsstrategie voraus und zeigt einen sehr lösungsorientierten Charakter und verhindert damit eine problemorientierte differenzierte Sicht auf die Zielgröße.

Ähnlich wie RATH ET AL.¹⁸⁷ entwickeln auch BONVOISIN ET AL.¹⁸⁹ eine Methode zur Identifikation projektspezifisch geeigneter Design-Richtlinien um die Entwicklung energieeffizienter Produkte zu unterstützen. Hierbei wird eine umfassende Liste aus dem Stand der Forschung zusammengetragener und verdichtete Richtlinien über drei Suchkriterien verfügbar gemacht. Diese sind die betroffenen Produktentwicklungstätigkeiten nach PAHL UND BEITZ¹⁹⁰, die betroffenen Unternehmensabteilungen sowie die Tragweite der Entscheidung¹⁹¹, welche wiederum durch den zur Verfügung stehenden Entscheidungshebel des Anwenders beschrieben wird. Damit bietet dieser Ansatz die theoretische Möglichkeit die Unterschiedlichkeit der Zielgröße Energieeffizienz sowie der zur Zielerreichung zu verwendenden Maßnahmen, zumindest nach diesen drei Kriterien zu berücksichtigen. Eine entsprechende Unterstützung, wie die jeweils zu fokussierende Produktlebenszyklusphase bzw. Entwicklungstätigkeit identifiziert werden kann bietet jedoch auch diese Methode nicht.

ELIAS ET AL.¹⁹² unterscheiden zwischen intrinsischen, also durch Produkttechnologie und Werkstoffauswahl festgelegten, und nutzerbezogenen Energieverlusten, die die Energieeffizienz haushaltsnaher Produkte beeinflussen. Für die Reduktion dieser nutzerbezogenen Energieverluste entwickeln sie die drei Richtlinien

- Verbesserung der Kundenunterweisung¹⁹³
- Rückmeldung vermitteln
- Verwenden einer Nutzer-orientierten Gestaltung

Auch SWEENEY ET AL.¹⁹⁴ untersuchen die Rolle des Anwenders für die tatsächliche Einsparung von Energie in der Produktnutzungsphase. Dabei fokussieren sie jedoch primär die Auswirkungen für Energieversorger und Politik. Sie identifizieren eine Vielzahl an Hemmnissen und Unterstützungsfaktoren für eine energieeffiziente

¹⁸⁹ Vgl. Bonvoisin; Mathieux et al. 2010 und Moenne-Loccoz; Trmblay et al. 2010

¹⁹⁰ Vgl. Pahl et al. 2007, S.3

¹⁹¹ Aus dem Englischen „decision scale“

¹⁹² Elias et al. 2009b

¹⁹³ Aus dem Englischen „customer education“

¹⁹⁴ Sweeney et al. 2013

Anwendung. Obwohl die Untersuchung nicht im Kontext der Produktentstehung entsteht, so sollten ihre Ergebnisse und die vergleichbarer Arbeiten dennoch bei der Gestaltung energieeffizienter Produkte berücksichtigt werden, da der Anwender in vielen Fällen einen Schlüsselfaktor für eine tatsächlich effiziente Verwendung der Energie durch das jeweilige Produkt darstellt. SWEENEY ET AL. identifizieren bei den Anwendern zwei Gruppen von Motiven zur Einsparung von Energie: Ökologische bzw. umweltbezogene sowie ökonomische bzw. energiekostenbezogene Motive¹⁹⁵.

NEUGEBAUER ET AL.¹⁹⁶ greifen für die Entwicklung energieeffizienter Werkzeugmaschinen den Property-Driven-Design-Ansatz¹⁹⁷ auf. Bei Anwendung dieses Ansatzes wird die Energieeffizienz eines Systems als dessen zentrale Eigenschaft betrachtet, welche in einem zielgerichteten Syntheseprozess optimiert werden soll. Dafür werden zunächst ähnliche, bestehende Produkte analysiert und hinsichtlich ihres Energieaufwands untersucht. Hierfür werden ausführliche Informationen zu den im System verlaufenden Energieflüssen, den eingesetzten Energieformen, -speichern, -wandlern und -verteiltern benötigt. Zusätzlich müssen die unterschiedlichen Betriebszustände des Produkts festgelegt werden. In Anlehnung an die ursprüngliche Vorgehensweise des Property-Driven Designs folgt daraufhin ein Syntheseprozess, der eine gezielte Reduktion des Energieaufwands der identifizierten Verbraucher anstrebt. Hierfür werden dem Anwender verschiedene Ansätze vorgeschlagen, die er in der angegebenen Reihenfolge auf ihre Eignung hin untersuchen soll.¹⁹⁸

- (Vorübergehende) Vermeidung des Energieverbrauchs
- Bedarfsorientierter Energieverbrauch
- Allgemein höhere Energieeffizienz
- Nutzung von Abfallenergie

Abschließend werden die Verbesserungen in einem weiteren Analyseschritt hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt. NEUGEBAUER ET AL. empfehlen dafür sogenannte Energieeffizienzindizes, die die Energieeffizienz in Ausgangs- und Endzustand zueinander ins Verhältnis setzen. In ihrer Arbeit unterscheiden sie zwischen mehreren solcher Indizes, welche aber immer einen vorher/nachher-Vergleich abbilden.¹⁹⁹

¹⁹⁵ Vgl. Sweeney et al. 2013, S. 374

¹⁹⁶ Neugebauer et al. 2009

¹⁹⁷ Property-Driven-Design beschreibt ein auf dem Characteristics-Properties Modelling-Ansatz basiertes Verfahren zur Produktentwicklungsmodellierung.

¹⁹⁸ Vgl. Stadler 2012 (betreute Abschlussarbeit)

¹⁹⁹ Vgl. Neugebauer et al. 2009

Energiemonitoring und -analyse

Ein im Maschinen- und Anlagenbau weitverbreiteter Ansatz ist das Energiemonitoring beziehungsweise die darauf aufbauende Energieanalyse. Basierend auf einem kontinuierlichen Analyseprozess an bestehenden Systemen, können die daraus gewonnenen Ergebnisse sowohl für die Anpassung an veränderte Betriebsituationen²⁰⁰ als auch für die Entwicklung nachfolgender Produktgenerationen unter Berücksichtigung der energetischen Aspekte verwendet werden.

Dieser Ansatz wird in der Regel zur Überwachung und Regelung komplexer Anlagen verwendet. Dabei ermöglicht er eine einfache Übersicht zu Energieverbräuchen, entsprechenden Energiekosten und erlaubt so die Erfassung von Effizienzdaten einzelner Maschinen oder ganzer Prozesse. Somit können Hauptenergieverbraucher betriebspunktabhängig identifiziert oder auch langfristige Trends erfasst werden. So lassen sich Schwachstellen und Verlustquellen lokalisieren und Einsparpotenziale aufzeigen.²⁰⁰ Die erhobenen energiestatistischen Daten können dann als Grundlage für die Entwicklung neuer Anlagen oder Maschinen dienen.

Checklisten

Checklisten sind vergleichsweise einfache Werkzeuge, um die Gestaltung energieeffizienter Produkte auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen der Entwicklung zu unterstützen. Übliche Erscheinungsformen sind Listen mit generalisierten Handlungsempfehlungen oder -anweisungen²⁰¹, einfache Fragebögen, die eine Identifikation der effizienztechnischen Schwachstellen unterstützen, Kataloge mit Sammlungen von Bewertungskriterien hinsichtlich der Energieeffizienz, oder einfache Sammlungen von Gestaltungsprinzipien, aus denen sich im Entwicklungsprozess Anregungen für Gestaltungsoptionen ableiten lassen. Wegen ihrer theoretisch universellen Anwendbarkeit und der einfachen Handhabung im industriepraktischen Entwicklungsumfeld gehören sie zu den meist verbreiteten Instrumenten und gelten dabei als vergleichsweise konkret und problemspezifisch.²⁰²

Beispielhaft sei hier die Ecodesign-Checkliste nach TISCHNER ET AL.²⁰³ genannt, welche einer Stärken-Schwächen-Analyse eines bestehenden Produktes oder als Detaillierungshilfe im Entwicklungsprozess dient und die Bewertung begleitet von Empfehlungen wie beispielsweise „Verpackungsaufwand minimieren“, „Emissionen

²⁰⁰ Vgl. Junge und Holzäpfel 2011

²⁰¹ Vgl. Konrad 2002

²⁰² Vgl. Knight und Jenkins 2009

²⁰³ Tischner et al. 2000

vermeiden“ oder „hohe Wertschöpfung beim Nutzer erzeugen“, die entlang der Produktlebenszyklusphasen gruppiert sind.

Eine einfache Anwendbarkeit und kurze Einarbeitungszeit sind wesentliche Vorteile von Checklisten in der praktischen Anwendung, die ein systematisches Vorgehen unterstützen. Obwohl die Form der Checkliste dies prinzipiell ermöglichen würde, besteht aktuell keine Lösung, welche ein differenziertes Verständnis der Energieeffizienz oder ihrer projektspezifischen Relevanz unterstützt.

2.4.3 Bewertung von Relevanz und Potenzial der Energieeffizienz

Aufgrund der generischen und heterogenen Eigenschaft des Begriffs der Energieeffizienz, bietet es sich im Vorfeld einer Berücksichtigung derselben als Zielgröße an, ihre spezifische Bedeutung sowie Wichtigkeit und Potenzial differenziert zu untersuchen und zu bewerten. Die Einschätzung der Wichtigkeit oder Bedeutsamkeit, die einer Sache in einem bestimmten sachlichen oder fachlichen Zusammenhang zugeordnet wird, bezeichnet man als Relevanz.²⁰⁴ Daher wird im weiteren Verlauf der Arbeit hierfür der Begriff der Relevanz verwendet.

Das Potenzial beschreibt etwas, das „(nach den Gegebenheiten) möglich (aber nicht tatsächlich gegeben)“ oder „als Möglichkeit vorhanden“ ist.²⁰⁵ Es beschreibt demnach die Möglichkeit einer noch nicht ausgeschöpften Entfaltung. Dabei können verschiedene Ausprägungen des Potenzials unterschieden werden. Lässt sich das Potenzial als Anteil eines optimalen höchsten Zustands einer solchen Entfaltung ausdrücken, wie es für die meisten technischen Systeme und Prozesse der Fall ist, so wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff *technisches Potenzial* verwendet. Dieses, unter den gegebenen technologischen Randbedingungen tatsächlich ausschöpfbare, Potenzial wird nochmals von einem nur unter idealen Bedingungen erreichbaren *theoretischen Potenzial* abgegrenzt. Letzteres basiert in der Regel auf der Annahme idealer thermodynamischer Prozesse, weswegen es auch als Effizienz des Zweiten Hauptsatzes²⁰⁶ bezeichnet wird²⁰⁷. Beschreibt das Potenzial hingegen das Ausmaß einer durch die Energieeffizienzsteigerung ermöglichten zusätzlichen Nutzenentfaltung, welche für gewöhnlich nicht durch einen optimalen Zustand höchsten Nutzens gekennzeichnet ist, so wird der Begriff des *Bedarfpotenzials* verwendet.

²⁰⁴ Wikipedia 2014

²⁰⁵ Bibliographisches Institut 2014, Onlineausgabe vom 23.01.2014

²⁰⁶ Vgl. Abschnitt 2.3.2

²⁰⁷ Vgl. Patterson 1996, S. 380

ELIAS ET AL.²⁰⁸ beschreiben, wie sie durch die Beobachtung von Anwenderverhalten im Umgang mit haushaltsnahen Produkten, Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz aufdecken. Dabei orientieren sie sich an der aktuellen Höhe des Energieaufwands, dem technischen Potenzial der einzelnen Produkte sowie dem Ausmaß der Anwenderinteraktion mit dem Produkt. Das Potenzial von Energieeffizienzsteigerungen wird hier als die prozentuale oder absolute Differenz zwischen der existierenden Lösung zu theoretischem oder technischem Optimum beschrieben. Das so ermittelte Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz durch zentrale Berücksichtigung des Nutzerverhaltens basiert unter anderem auf empirischen Studien von LINDEN ET AL.²⁰⁹ zu dieser Thematik, welche hohe Energieeinsparungen durch eine Anpassung des Nutzerverhaltens beschreiben.

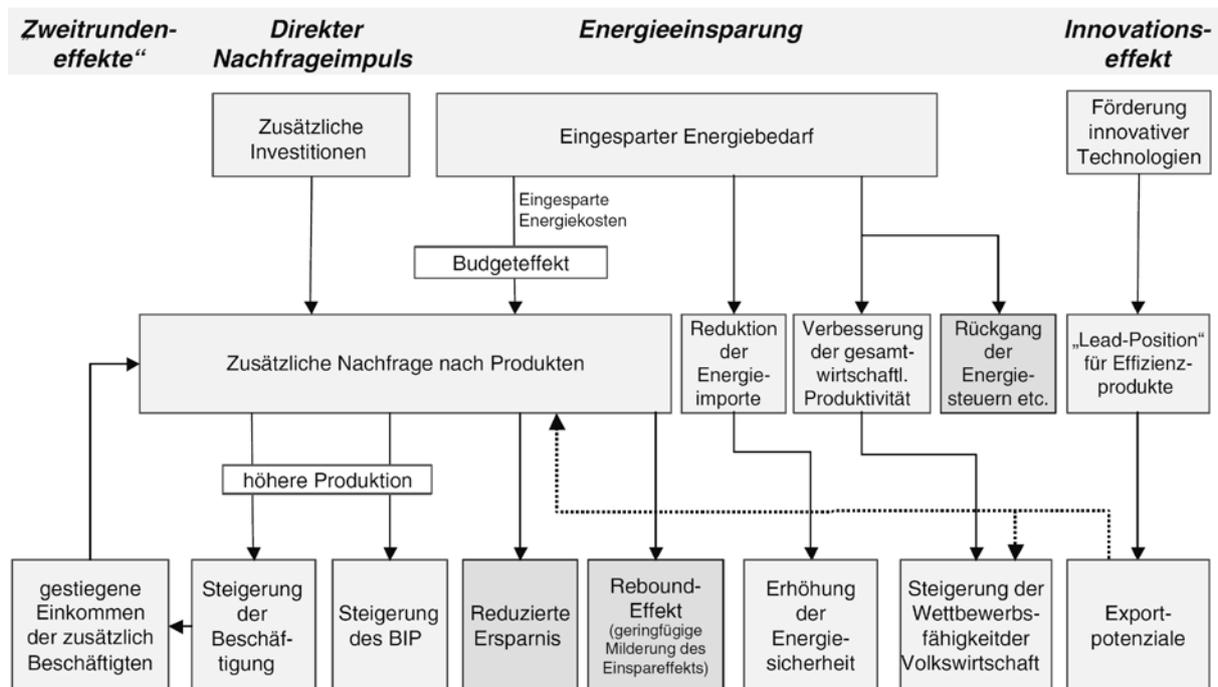


Abbildung 18: Volkswirtschaftliche Effekte der Energieeffizienz.²¹⁰

Häufig verwenden Arbeiten, die sich mit der Entwicklung energieeffizienter Produkte beschäftigen, den Begriff des Potenzials ohne ihn gesondert zu definieren oder abzugrenzen. So ist die eigentliche Bedeutung nicht immer ersichtlich und es muss von einer abstrakten allgemeinen Bedeutung ausgegangen werden.

²⁰⁸ Elias; Dekoninck et al. 2007a und Elias; Dekoninck et al. 2008

²⁰⁹ Vgl. Linden et al. 2005 nach Elias; Dekoninck et al. 2007a

²¹⁰ aus Pehnt 2010, S.11

Arbeiten im Bereich makroökonomischer und politischer Fragestellungen zum Thema der Energieeffizienz beschäftigen sich hingegen häufig explizit mit den Aspekten Relevanz und Potenzial.²¹¹ Dabei wird die Relevanz unter verschiedenen Gesichtspunkten, wie beispielsweise der ökonomischen Aspekte in Form der Primärenergieintensität²¹² oder sozialer Aspekte in Form der Energiearmut²¹³ untersucht. Ebenso differenziert wird in diesem Kontext das Potenzial berücksichtigt: So wird nach ENQUETE²¹⁴ unterschieden zwischen theoretischem, technischem und wirtschaftlichem Potenzial sowie dem tatsächlich realisierbaren Erwartungspotenzial. Insbesondere bei der Beurteilung des politischen, gesellschaftlichen oder makroökonomischen Potenzials werden weitere Effekte wie beispielsweise Innovation, Wirtschaftswachstum oder Rebound-Effekt²¹⁵ berücksichtigt (siehe auch Abbildung 18).

2.4.4 Zwischenfazit

Die vorgestellte Auswahl von bestehenden Methoden des Design to Energy Efficiency zeigt die Unterschiedlichkeit ihrer analytischen oder syntheseorientierten Schwerpunkte zur Unterstützung der Produktgestaltung. Dabei werden von den generischen, weitestgehend motivationsneutralen Methoden im Wesentlichen die syntheseorientierten Aktivitäten der Ideenfindung, der Modellierung von Prinzip und Gestalt sowie der idealerweise vorgelagerten Aktivitäten einer Nutzungsanalyse adressiert. Die eindimensional motivierten Methoden, welchen vorwiegend ökologische Motive zugrunde liegen, wählen einen entsprechend ganzheitlichen Ansatz und adressieren den gesamten Produktlebenszyklus, betrachten die Energieeffizienz dabei jedoch nahezu ausschließlich aus der motivgebenden Perspektive.

Das Potenzial von Energieeffizienzsteigerungen wird, wenn überhaupt berücksichtigt, als die prozentuale oder absolute Differenz zwischen dem aktuellen Zustand und dem theoretischem oder technischem Optimum beschrieben. Eine Bewertung der projektspezifischen Relevanz einer Energieeffizienzsteigerung, insbesondere aus

²¹¹ Vgl. Pehnt 2010, S.36

²¹² Primärenergieintensität beschreibt das Verhältnis aus Primärenergieaufwand und erwirtschaftetem Bruttoinlandsprodukt

²¹³ Energiearmut basiert auf den drei wesentlichen Faktoren: geringes Haushaltseinkommen, hohe Energiekosten sowie ein hoher Haushaltsenergieverbrauch aufgrund mangelnder Energieeffizienz des Gebäudes.

²¹⁴ Vgl. Enquete 1995

²¹⁵ Der Rebound-Effekt beschreibt die (Über-)kompensation von energieeffizienzbasierten Energieeinsparungen durch den eben darauf zurückzuführenden Mehrkonsum.

den unterschiedlichen motivierenden Sichten, wird in keinem der untersuchten Ansätze betrachtet.

Insgesamt ermöglichen oder unterstützen die vorgestellten Ansätze keine ausreichend differenzierte Identifikation, Betrachtung oder Relevanzbewertung der Energieeffizienz mit Berücksichtigung der unterschiedlichen zugrunde liegenden Motivationen und Bedeutungen sowie des entsprechend differenzierten Wertschöpfungspotenzials. Des Weiteren findet sich im Stand der Forschung keine ausreichende Betrachtung und dementsprechend auch keine umfassende methodische Unterstützung zur Überführung der Energieeffizienz als initiale Zielgröße in handhabbare Ziele.

2.5 Kenngrößen zur Beschreibung der Energieeffizienz

Eine Zielerreichungsüberprüfung sowie die Bewertung aktueller Energieeffizienzstände und erforderlicher Maßnahmen für ihre Steigerung, benötigen eine messbare Zielgröße. Daher ist die Messbarkeit der Energieeffizienz eine Grundvoraussetzung für ihre sinnvolle Verwendung als Zielgröße. Da die Energieeffizienz jedoch ein theoretisches Konstrukt²¹⁶ ist, kann sie nicht auf direktem Weg gemessen werden. Daher werden Kenngrößen und Indikatoren benötigt, die entweder die Energieeffizienz selbst, oder aber ihre Entwicklung durch Vergleiche geeigneter Daten angemessen darstellen.

Indikatoren sind künstliche Hilfsmittel zur informatorischen, analytischen oder zielorientierten Abbildung abstrakter oder komplexer Zustände. Häufig dienen sie primär dem Vergleich unterschiedlicher Datensätze aus verschiedenen Produkten, Marktsektoren, Ländern oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten²¹⁷.

2.5.1 Anforderungen an Energieeffizienz-Kennzahlen

Bei der Auswahl oder Entwicklung von Kennzahlen im Allgemeinen aber auch speziell zur Beschreibung der Energieeffizienz sind einige grundsätzliche Anforderungen zu beachten. DIEKMANN ET AL.²¹⁸ behandeln diese Thematik ausführlich im Kontext der politischen Praxis. WILKENS ET AL.²¹⁹ betrachten eine ähnliche Fragestellung im Kontext der Energieeffizienzbetrachtung von Rechenzentren. Einige der von beiden Arbeiten beschriebenen Anforderungen bestehen

²¹⁶ Vgl. Abschnitt 2.3.1

²¹⁷ Vgl. Pehnt 2010, S.27

²¹⁸ Diekmann et al. 1999

²¹⁹ Wilkens; Drenkelfort et al. 2011

ebenfalls im Kontext der Produktentwicklung und werden daher im Folgenden vorgestellt²²⁰:

- Datenverfügbarkeit / Messbarkeit: Die der Kenngröße zugrunde liegenden Daten sollten möglichst leicht verfügbar oder mit geringem Aufwand zu erheben sein und dabei in angemessener Datengüte vorliegen.
- Vergleichbarkeit: Abhängig vom Zweck sollten die Indikatoren sachlich und zeitlich oder räumlich vergleichbar sein.
- Verständlichkeit: Die Formulierung sollte zweckorientiert und verständlich sein.
- Konsistenz: Widerspruchsfreiheit bezüglich der Datenbasis und den verwendeten methodischen Ansätzen.
- Überprüfbarkeit: Datenbasis und Berechnungsmethoden sollten nachvollziehbar und überprüfbar sein.
- Problemrelevanz / Zielbezug: Auswahl und Konkretisierung der Indikatoren sollte mit Blick auf die wesentliche Fragestellung erfolgen. Dabei ist auch auf die Repräsentanz der verwendeten Daten zu achten.

Abhängig vom Anwendungsfall und dem Zweck der Kenngröße sind in Ergänzung geeignete Referenzzyklen zu definieren (vgl. Abschnitt 7.1), um Konsistenz, Überprüfbarkeit, Vergleichbarkeit und Problemrelevanz sicher zu stellen. Insbesondere im automobilen Kontext ist die Angabe von Energieeffizienzkenngößen²²¹ unter Angabe des zugrunde liegenden Referenzzyklus üblich. An Entwicklung oder Auswahl geeigneter Referenzzyklen sind wiederum eigene Anforderungen zu stellen, die beispielsweise in den Arbeiten von DORRER²²² behandelt werden.

Da es im Rahmen dieser Arbeit um Kenngrößen zur Abbildung von Energieeffizienzzielen geht, gelten zusätzliche Anforderungen für eine Operationalisierbarkeit von Zielen. Nach der WIRTSCHAFTSENZYKLOPÄDIE konkurriert die Operationalisierbarkeit in der Regel mit dem Repräsentationsgehalt von Zielvariablen. So muss im wirtschaftlichen Kontext immer ein Kompromiss aus der Übereinstimmung von Zieldefinition und Zielvorstellung und ihrer Operationalisierbarkeit gefunden werden²²³. Dieses Spannungsfeld lässt sich auch auf Zielsetzungen bezüglich der Energieeffizienz übertragen.

²²⁰ Vgl. Diekmann et al. 1999, S. 121f und Wilkens; Drenkelfort et al. 2011, S.5

²²¹ In der Regel der Kraftstoffverbrauch pro 100km oder pro 100 Personenkilometer

²²² Dorrer 2004, S. 38

²²³ Vgl. Wirtschaftszyklopädie 2014

Dabei bestehen drei grundsätzlichen Anforderungen an Ziele bezüglich ihrer Operationalisierbarkeit:²²⁴ Die Konkretisierbarkeit oder Quantifizierbarkeit fordert die Existenz von realen Phänomenen, welche als Defintionsmerkmale des Ziels dienen und den Inhalt des Ziels hinreichend genau wiedergeben können. Messbarkeit erfordert die Feststellbarkeit und damit die Verfügbarkeit geeigneter Maßgrößen. Die Aggregierbarkeit schließlich fordert im Fall von mehreren Defintionsmerkmalen für ein einzelnes Ziel die Existenz einer durchführbaren Aggregationsvorschrift zur systematischen Kombination der Merkmale.

2.5.2 Wesentliche Einflüsse auf Kennzahlen der Energieeffizienz

Da Kenngrößen der Energieeffizienz häufig auf Basis komplexer und umfangreicher Daten²²⁵ zusammengestellt werden, ist ein wesentlicher Einfluss bezüglich ihrer Validität bereits während ihrer Ermittlung durch unsicherheitsbehaftete Datengrundlagen sowie einer ebensolchen Datenverdichtung zu sehen. Dazu gehören beispielsweise Messfehler, nicht ausreichende Repräsentativität der Bezugsobjekte, Vernachlässigung relevanter Einflussfaktoren sowie eine falsche Gewichtung einzelner Merkmale während der Aggregation.²²⁶ Weitere kritische Einflüsse ergeben sich aus Anforderungen, die an Vergleiche²²⁷ zwischen Kenngrößen gestellt werden. Nach LÖFFLER zählen hierzu gleiche Erhebungsgrundlagen, d.h. Gleichheit bezüglich Zeitraum, Energiegrößen, und Bezugsgrößen sowie weitere Randbedingungen oder Einflussgrößen²²⁶. Für eine angemessene Nachvollziehbarkeit müssen diese Einflussgrößen gemeinsam mit den entsprechenden Energiekennwerten erfasst, erläutert und dokumentiert werden.

Die möglichen Auswirkungen bei Vernachlässigung der oben genannten Einflüsse können anhand eines Beispiels aus der praktischen Verbrauchersicht erläutert werden: Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie fördert eine von der deutschen Energie-Agentur betriebene Internetseite²²⁸ als Orientierungshilfe privater Verbraucher beim Erwerb energieeffizienter Produkte. Hier kann der Anwender beispielsweise Fernseher hinsichtlich ihrer Energiekosten über unterschiedliche Zeiträume oder hinsichtlich ihrer Energieeffizienz vergleichen. Sortiert man die Geräte nach der Einstufung gemäß Energieeffizienzlabel²²⁹ nach dem Standard A++,

²²⁴ Vgl. Mamberer und Seider 2009 und Wirtschaftszyklopädie 2014

²²⁵ Komplex bedeutet in diesem Kontext auch wechselwirkungsbehaftet

²²⁶ Vgl. Löffler 2011

²²⁷ die meisten Energiekennzahlen basieren auf Zeit-, Betriebs- oder systembezogenen Vergleichen

²²⁸ Vgl. Dena 2014

²²⁹ Nach Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG (2012) zur Umsetzung der 2010/30/EU (2010)

so werden außer einem Gerät mit 127cm Bildschirmdiagonale, nur noch drei weitere Geräte, die jeweils eine Diagonale von 203cm aufweisen²³⁰, ausgewiesen. Es erfüllen also nur noch die größten Geräte diese Bedingung. Anhand dieses Beispiels kann hinterfragt werden, ob die Bildschirmdiagonale mit einer überverhältnismäßigen Gewichtung bei der Aggregation des dem Label zugrunde liegenden Indikators eingegangen ist, da so keine praktisch relevanten Aussagen mehr aus dem Indikator gezogen werden können.

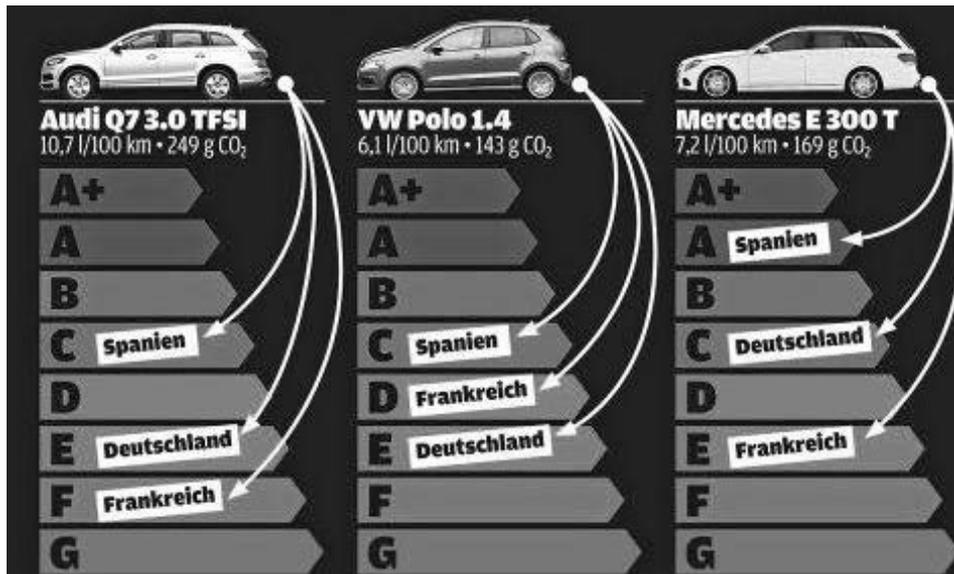


Abbildung 19: Unterschiedliche Zuteilung von Effizienzklassen zu einzelnen Fahrzeugen in verschiedenen EU-Ländern.²³¹

Ein weiteres Beispiel für die Sensitivität von Kennzahlen bezüglich ihrer Datengrundlage sowie dem Umfang und der Gewichtung der einzelnen berücksichtigten Merkmale und für die dadurch beschränkte Aussagekraft ist das Effizienzlabel²³² für Neuwagen²³³. Wie in Abbildung 19 dargestellt ist, werden einzelne PKW-Modelle in verschiedenen EU-Ländern in sehr unterschiedliche Effizienzklassen eingeteilt. Dies liegt daran, dass die zugrunde liegende Verordnung²³³ die grundsätzliche Kennzeichnung verpflichtend vorschreibt, die Aggregationsvorschriften für die Indikatoren jedoch offen lässt. Auch die bei der Aggregation zu berücksichtigenden Merkmale können von Land zu Land unterschiedlich sein. So wird beispielsweise in Deutschland neben dem CO₂-Ausstoß zusätzlich das Fahrzeuggewicht berücksich-

²³⁰ <http://www.stromeffizienz.de/private-verbraucher/onlinehilfen/topgeraete-datenbank/unterhaltung.html> (zuletzt geprüft am 23.01.2014)

²³¹ Aus Wieland 2013

²³² Tatsächlich beschreibt das sogenannte Label keine Energie- sondern eine Emissionseffizienz. Die dargestellte Problematik bleibt davon jedoch unberührt.

²³³ Vgl. Pkw-EnVkv (2004)

tigt, Niederlande und Spanien dagegen beziehen die Grundfläche des Fahrzeugs in die Berechnung mit ein. So erhalten die Fahrzeuge in drei EU-Ländern sehr unterschiedliche Einstufungen im Effizienzlabel.²³⁴

Um konsistente und aussagekräftige Kennzahlen zu erhalten, sollte sich die Aggregation von Kennzahlen möglichst an den methodischen Grundlagen systematischer bewertungstechnischer Entscheidungsprozesse orientieren.²³⁵ Die Richtlinie VDI 4661²³⁶ gibt hierfür einen allgemein verbindlichen Rahmen hinsichtlich der Definition von Begriffen, der Erhebung relevanter Daten, der Verwendung geeigneter Berechnungsmethoden sowie der Interpretation von Energiekennwerten. Dabei unterscheidet die Richtlinie naturwissenschaftliche, insbesondere thermodynamische, ingenieurtechnische und ökonomische Betrachtungen.

Grundsätzlich kann nicht zwischen guten oder schlechten Indikatoren per se unterschieden werden. Vielmehr muss ein sinnvoller Indikator immer wieder situations- und zweckabhängig ausgewählt und erstellt werden. Dabei ist auf einen angemessenen, dem eigentlich Zweck unterzuordnenden, Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Überschaubarkeit zu achten. Was in diesem Zusammenhang als zweckgerecht gilt, hängt vor allem von den zu erwartenden Nutzern (Experten, Öffentlichkeit, Verbraucher, etc.) und der Aufgabe des Indikators (Information, Zielformulierung, Analyse, etc.) ab.²³⁷

2.5.3 Überblick ausgewählter Energieeffizienz-Kennzahlen

Grundsätzlich können verschiedene Kennzahlen zur Beschreibung der Energieeffizienz in Abhängigkeit ihres Darstellungszwecks sowie ihres Geltungsbereichs unterschieden werden. PATTERSON²³⁸ unterscheidet dabei vier Kategorien von Indikatoren²³⁹:

- Thermodynamische Indikatoren: Diese basieren vollständig auf thermodynamischen Maßen und Messungen. Manche sind einfache Verhältniskennzahlen, andere sind komplizierte Kennzahlen, die tatsächliche Werte, thermodynamisch idealen Prozessen gegenüber stellt.

²³⁴ Mercedes E300T: A (Spanien), C (Deutschland), E(Frankreich); Audi Q7 3.0 TFSI: C (Spanien), E (Deutschland), F (Frankreich)

²³⁵ Vgl. Breiing und Knosala 1997

²³⁶ VDI 4661 (2003)

²³⁷ Vgl. Diekmann et al. 1999

²³⁸ Patterson 1996

²³⁹ Nach Patterson 1996, S.378

- Physikalisch-thermodynamische Indikatoren²⁴⁰: Hybride Kennzahlen, bei welchen der energetische Aufwand üblicherweise in thermodynamischen Größen, der Nutzen jedoch in physikalischen Größen angegeben wird. Diese physikalischen Größen sollen den Service-Nutzen des Prozesses beschreiben, beispielsweise in Tonnen eines Produkts oder Personenkilometer.
- Ökonomisch-thermodynamisch Indikatoren: Diese sind ebenfalls hybride Kennzahlen, bei welchen der Service-Nutzen mittels Marktpreisen quantifiziert wird. Der energetische Aufwand wird auch hierbei in thermodynamischen Größen angegeben.
- Ökonomische Indikatoren: Diese Indikatoren geben die Energieeffizienz bzw. ihre Veränderungen ausschließlich durch Marktwerte wieder. Sowohl der Service-Nutzen, als auch der energetische Aufwand werden in monetären Größen beschrieben.

Zur Beschreibung der Energieeffizienz als Zielgröße im Kontext der Produktentwicklung spielen die ökonomischen und ökonomisch-thermodynamischen Kennzahlen eine untergeordnete Rolle. In der betrieblichen Praxis der Produktion wird die Effizienz jedoch häufig in ökonomischen Kennzahlen betrachtet.²⁴¹ In den folgenden Abschnitten werden thermodynamische und physikalisch-thermodynamische Kenngrößen diskutiert, die in diesem Kontext besondere Relevanz besitzen. Um einen breiten Überblick zu ermöglichen, wird zusätzlich ein besonders wichtiger ökonomischer Indikator vorgestellt.

Energetischer Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

Die wohl bekannteste und in der betrieblichen Praxis der Produktentwicklung am häufigsten verwendete Kennzahl zur Beschreibung der Energieeffizienz ist der energetische Wirkungsgrad²⁴². Dieser wird durch das Verhältnis einer nutzbaren Ausgangsleistung zur Eingangsleistung von energetischen Umsetzungen in technischen Systemen beschrieben. Besonders kritisch zu bewerten ist die Tatsache, dass der Wirkungsgrad nur für einen bestimmten Betriebspunkt eines Systems Gültigkeit besitzt, welcher nicht zwangsläufig dem realen Betriebsverhalten entspricht. Obwohl auch hier ein nutzenähnlicher Aspekt im Verhältnis zum Aufwand steht, ist der Wirkungsgrad keineswegs gleichbedeutend mit Energieeffizienz. Die Energieeffizienz ist ein Maß für den energetischen Aufwand zur Erreichung eines

²⁴⁰ Aus dem englischen Original: physical. Hier synonym zu materiell zu verstehen.

²⁴¹ Vgl. Festo 2012

²⁴² Auch „elektrischer Wirkungsgrad“

zuvor definierten Nutzens²⁴³. Hierbei ist, im Gegensatz zum energetischen Wirkungsgrad, der Nutzen jedoch nicht zwangsläufig energetisch definiert. Dies hat zur Folge, dass eine Beschreibung des Nutzens freier und damit tendenziell problemrelevanter formuliert werden kann, die konsistente Quantifizierung und somit die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme jedoch erschwert wird.

Eine alternative Möglichkeit die Energieeffizienz mit einer einfachen Kenngröße zu bewerten, bietet der energetische Nutzungsgrad. Dieser setzt die Energie, welche in einem bestimmten Zeitraum nutzbar gemacht wurde zur im gleichen Zeitraum dafür aufgewendeten Energie ins Verhältnis, wobei im Gegensatz zum Wirkungsgrad auch Betriebszustandswechsel, wie Pausen-, Leerlauf-, oder An- und Herunterfahrzeiten, mitberücksichtigt werden²⁴⁴. Somit stellt er einen über die Zeit gemittelten Wirkungsgrad dar.

Tabelle 2: Typische Wirkungsgrade verschiedener technischer Systeme²⁴⁵ (ggf. mit Energieformänderung: m=mechanisch, e=elektrisch, c=chemisch, s=Strahlung, t=thermisch)

Energiewandler	Energieformen	Wirkungsgrad [%]
Generator	m→e	98-99
Wasserturbinen	m→m	90-95
Heizungskessel	c→t	90-94
Trocken-Batterien	c→e	85-95
Kleiner Elektromotor	e→m	60-75
Diesel-Motor	c→m	30-35
Otto-Motor	c→m	25-30
Fotozellen (Prototypen)	s→e	20-25
Fotozellen (Serienprodukt)	s→e	5-10
Elektroleuchten	e→s	2-30

Jedoch ist es auch bei der Formulierung des Nutzungsgrads erforderlich, den Nutzen energetisch zu formulieren, was den tatsächlichen Produktnutzen nur in Ausnahmefällen angemessen wiedergeben kann.

²⁴³ Vgl. Abschnitt 2.3.1

²⁴⁴ Vgl. VDI 4661 (2003) und Pehnt 2010, S.25

²⁴⁵ Nach Pehnt 2010, S.26

Energieeffizienzkennzahlen nach EU-Richtlinien

Nach der europäischen Verordnung 2010/30/EU²⁴⁶, die in Deutschland durch das Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG²⁴⁷ umgesetzt wird, muss eine zunehmende Zahl ausgewählter energieverbrauchender Produkte²⁴⁸ im Handel mittels vorgeschriebener Labels ausgezeichnet werden, die den Verbraucher über die Ressourceneffizienz des Produkts informieren sollen. Davon betroffen sind aktuell elf Produktsegmente²⁴⁹. Die Effektivität solcher Labels ist nicht unumstritten und ist daher wiederum Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten²⁵⁰, auf die an dieser Stelle verwiesen wird. Die Zuordnung eines Produkts zu den einzelnen Energieeffizienzklassen der Bewertungsskala des Labels, erfolgt nach eigens hierfür entwickelten Kennzahlen. Dafür werden zunächst mehrere Größenklassen für die einzelnen Arten von Geräten festgelegt. Die Größenklassen werden zur Wahrung der Problemrelevanz an unterschiedlichen geometrischen Dimensionen orientiert, wie beispielsweise Diagonale, Volumen oder Masse. Die Zuordnung eines Gerätes zu einer Energieeffizienzklasse erfolgt nach einer Bewertung der Abweichung seines tatsächlichen Energieverbrauchs von einem zuvor definierten Referenzwert seiner Größenklasse. Die jeweiligen fiktiven Referenzgeräte sowie die Aggregationsvorschriften sind in den Verordnungen auf nationaler Ebene geregelt.²⁵¹

Die uneinheitlichen Aggregationsvorschriften sowie die national unterschiedlich geregelten Referenzwertberechnungen stehen häufig in der Kritik, die eigentliche Intention der europäischen Verordnung²⁴⁶ nicht ausreichend abzubilden und durch Vernachlässigung der Problemrelevanz der verwendeten Kennzahlen, die Verbraucher zu täuschen.²⁵²

Spezifische Energieeffizienzkenngößen

In der Richtlinie VDI 4661 wird der spezifische Energiebedarf als eine der wichtigsten Kenngrößen für energetische Betrachtungen und Wertungen bezeichnet.²⁵³ Er beschreibt das Verhältnis von Energieeinsatz zu einer geeigneten funktionalen Einheit. Dabei sollte „das Produkt bzw. die Dienstleistung definierte Qualität

²⁴⁶ 2010/30/EU (2010)

²⁴⁷ Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG (2012)

²⁴⁸ Produkte, die von eigens hierfür einberufenen Kommissionen als energieverbrauchsrelevant eingestuft werden, unterliegen der Kennzeichnungspflicht.

²⁴⁹ Ministerium für Klima und Energiewirtschaft und Umwelt 2013

²⁵⁰ Vgl. Newell; Siikamäki 2013

²⁵¹ Vgl. Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG (2012)

²⁵² Vgl. Stiftung Warentest 2011

²⁵³ Vgl. VDI 4661 (2003), S.15

haben.“²⁵⁴ Bei komplexeren Sachverhalten, welche in funktionalen Einheiten abgebildet werden sollen, ergibt sich somit das Problem einer ausreichenden umfassenden Qualitätsdefinition in Form ergänzender Angaben.

NEUGEBAUER ET AL.²⁵⁵ plädieren für die Nutzung von sogenannten Energieeffizienzindizes (EEI), welche die Energieeffizienz des Systems in Ausgangs- und Endzustand zueinander ins Verhältnis setzen. In ihrer Arbeit unterscheiden sie dabei verschiedene Ausprägungen, die aber immer jeweils einen vorher („set“)/nachher („current“)-Vergleich darstellen (siehe Gl. 2.4).²⁵⁶

$$EEI = \frac{\varepsilon_{set}}{\varepsilon_{current}} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Energetischer Aufwand zur Beschreibung der Energieeffizienz

Einige Ansätze, wie beispielsweise nach DOMINGO ET AL.²⁵⁷ oder INGENEER ET AL.²⁵⁸ verwenden den reziproken energetischen Aufwand als Kenngröße für die Energieeffizienz. Dabei ergeben sich naturgemäß Inkonsistenzen, welche gegebenenfalls darauf basierende Produktoptimierungen zumindest fragwürdig erscheinen lassen. Eine Beschreibung der Effizienz ohne ein Maß für die Effektivität ist nicht zielführend. Daher kann der reine energetische Aufwand ausschließlich innerhalb vergleichbarer Nutzenprofile und Nutzenbewertungen zur vergleichenden Bewertung herangezogen werden, und berücksichtigt selbst dabei keinerlei Nutzenvariation bei gegebenen Gestaltungsalternativen.

Makroökonomische Indikatoren

Makroökonomische Indikatoren dienen der Beschreibung der Energieeffizienz auf volkswirtschaftlicher Ebene. Entsprechend bedient man sich für ihre Aufstellung Merkmalen hoher wirtschaftlicher Abstraktionsebene. In der volkswirtschaftlichen Praxis wird hierfür besonders häufig auf die Energieintensität zurückgegriffen. Diese beschreibt das Verhältnis aus Energieeinsatz zu einer wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Bezugsgröße, die üblicherweise in monetären Einheiten betrachtet wird. Die Energieproduktivität bezeichnet den Kehrwert der Energieintensität. Als Maß für die Energieintensität auf gesamtwirtschaftlicher Ebene dient häufig das

²⁵⁴ Vgl. VDI 4661 (2003), S.16

²⁵⁵ Neugebauer et al. 2009

²⁵⁶ Vgl. Neugebauer et al. 2009, S.10

²⁵⁷ Domingo; Mathieux et al. 2010

²⁵⁸ Ingeneer et al. 2012

Verhältnis von Primärenergiebedarf zu Bruttoinlandsprodukt²⁵⁹. Nach WEIZSÄCKER²⁶⁰ kann das Bruttoinlandsprodukt als Maß für die gesamte wirtschaftliche Leistung in einer Volkswirtschaft in einer Periode beschrieben werden. Da es „Auskunft über die Produktion von Waren und Dienstleistungen im Inland nach Abzug der Vorleistungen und Importe gibt, dient es als Produktionsmaß und damit als Indikator für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft“²⁶⁰.

2.5.4 Zwischenfazit

Es besteht eine breite und heterogene Basis an möglichen Kenngrößen zur Beschreibung der Energieeffizienz für unterschiedliche Zwecke. Der Fokus der Verwendung der bestehenden Kenngrößen liegt bisher auf der Information von Markt und Verbraucher oder der vergleichenden Analyse technischer Systeme und Prozesse. Daher wird die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Produkte angestrebt und führt teilweise sogar zu einer Vergleichbarkeit von Produkten vollkommen unterschiedlicher Nutzenprofile. Die Verwendung als Zielgröße insbesondere in der Produktentwicklung ist bisher nicht Gegenstand von Forschungsarbeiten, sodass die Ziele bezüglich der Energieeffizienz üblicherweise in den für andere Zwecke entwickelten Kenngrößen formuliert werden. Dies führt einerseits zu einer positiven Orientierung an den vom Kunden wahrgenommenen Indikatoren, beispielsweise in Form von Energieeffizienz-Labels, andererseits jedoch zur Verwendung nicht zielführender oder undifferenzierter, für die spezifische technische Aufgabenstellung ungeeigneter Zielgrößen.

Einen zentralen Konflikt bei der Formulierung von Energieeffizienz-Kenngrößen, insbesondere mit dem Zweck der Zielbeschreibung, stellt dabei der Trade-Off zwischen Problemrelevanz und Aussagekraft auf der einen Seite sowie Datenverfügbarkeit und Messbarkeit auf der anderen Seite dar.

²⁵⁹ Das BIP berechnet sich als Summe aus dem Konsum der Haushalte, den Investitionen der Firmen, der Staatsausgaben und der Nettoexporte

²⁶⁰ Weizsäcker 2014

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Die Entwicklung und Gestaltung energieeffizienter Produkte ist eine unumgängliche Maßnahme, um den heutigen Marktanforderungen gerecht zu werden. Diese betreffen beispielsweise eine effiziente Nutzung der begrenzten energetischen Ressourcen, eine Verringerung der mit der Energieumsetzung verbundenen Emissionen sowie eine Energieversorgung von mobilen Produkten und Anwendungen. Der Technologiestandort Deutschland kann sich in vielen Bereichen nur durch gezielte technologische Differenzierung gegen kostengünstigere internationale Wettbewerber durchsetzen, wobei die Energieeffizienz zu einem der häufigsten Differenzierungsmerkmale gehört. Insbesondere in Branchen energieintensiver und energiesensitiver Produkte ist eine solche technologische Abgrenzung notwendig und wird entsprechend von der Bundesregierung gefördert²⁶¹. Dabei bedeutet eine Steigerung der Energieeffizienz im besten Fall eine positive Erfüllung ökologischer, ökonomischer sowie technischer Anforderungen.

Die methodische Unterstützung zur Steigerung der Energieeffizienz erfordert die Berücksichtigung produkt- und projektspezifischer Sachverhalte und Besonderheiten. Die im vorherigen Kapitel beschriebenen bestehenden Ansätze zur Effizienzsteigerung vernachlässigen dabei eine ausführliche Zielklärung, was insbesondere bei abstrakten und produktspezifischen Ansätzen kritisch zu bewerten ist. Eine geeignete Ziel- und Anforderungskklärung sowie deren entsprechende Formulierung sind jedoch systemunabhängig eine zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Die Entwicklung initialer Zielsysteme und die Ableitungen von konkreten Zielen als Beschreibung eines Nutzenprofils des zu entwickelnden Produkts legen nahezu alle zukünftigen lösungsneutralen Produkteigenschaften maßgeblich fest. Gerade bei der Priorisierung einzelner Zielaspekte im Sinne eines *Design for X* oder *Design to X* ist eine differenzierte Betrachtung dieser Zielaspekte von besonderer Wichtigkeit.

Mithilfe des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM) nach ALBERS lassen sich die wesentlichen Aktivitäten der Produktentstehung darstellen. Bei der Betrachtung ihrer Bedeutung für die Entwicklung des Zielsystems lässt sich feststellen, dass die Aktivitäten Projektierung, Profilfindung und Validierung eine besondere Wichtigkeit

²⁶¹ Vgl. Förderdatenbank des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2008

für eine erfolgreiche Entwicklung energieeffizienter Produkte haben. Im Rahmen der Projektierung müssen erste Ressourcenplanungen nicht zuletzt auf Basis der zu erwartenden projektspezifischen Gewichtung von Zielen erfolgen. Dabei ist eine vergleichende Bewertung der einzelnen Zielrelevanzen erforderlich. Eine Bewertung der Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße ist aufgrund ihres abstrakten Charakters jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Weiterhin erfordern die Übersetzung der initialen Ziele in handhabbare Ziele und Anforderungen sowie die kontinuierliche Validierung eine Objektivierung²⁶² von ursprünglich generischen Zielgrößen. Eine solche Objektivierung bedarf jedoch weiterer ergänzender – die Zielgröße differenzierender – Maßnahmen, welche über den Stand der Forschung hinausgehen.

Im Kontext des Design to Energy Efficiency führen der generische Charakter sowie die heterogenen Bedeutungen der Energieeffizienz zu besonderen Herausforderungen. Beispielhaft hierfür sind das subjektive Zielverständnis und die damit verbundene individuelle Handhabung, der schwer zu quantifizierende Nutzenaspekt der Effizienz sowie die einseitige Potenzialbetrachtung, welche häufig nicht ausreichend wertschöpfungspotenzial-orientiert und somit im unternehmerischen Sinne nicht zielführend ist.

Die methodische Unterstützung des Design to Energy Efficiency beschränkt sich bisher im Wesentlichen auf Analyse-orientierte Ansätze zur Identifikation von technischen Energieeffizienz-Potenzialen oder Hauptverlustquellen sowie Synthese-orientierte generische oder systemspezifische Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz. Dabei findet bisher jedoch keine ausreichend differenzierte Betrachtung der Energieeffizienz unter Beachtung gegebenenfalls unterschiedlicher zugrunde liegender Motivationen und entsprechend unterschiedlicher Bedeutungen Berücksichtigung. Der Stand der Forschung bietet demnach keine ausreichende Hilfestellung zur Überführung des initialen generischen Ziels Energieeffizienz in handhabbare möglichst objektivierbare Zielgrößen im Kontext der Produktentwicklung.

Weiterhin bietet der Stand der Forschung keine geeigneten Ansätze zur Formulierung von Energieeffizienz-Zielen in eigens hierfür entwickelten Indikatoren. Der Fokus der Verwendung der bestehenden Kenngrößen liegt primär auf der Information für Markt und Verbraucher sowie dem technischen Vergleich mit

²⁶² Objektivierung beschreibt im Allgemeinen (Vgl. Bibliographisches Institut 2014) die Überführung von Merkmalen in eine der objektiven Betrachtung zugängliche Form, sodass sich diese unabhängig vom subjektiven Beobachter oder Messinstrument darstellen lassen. Die Komfortobjektivierung in der Fahrzeugentwicklung erreicht dies beispielsweise durch Korrelation von subjektiven emotionalen Komfortempfindungen mit physikalischen Messgrößen.

Wettbewerbern. Energieeffizienz-Ziele werden daher häufig in den bestehenden, für andere Zwecke entwickelten Kenngrößen formuliert. Dies führt jedoch zur Verwendung nicht zielführender oder undifferenzierter, für die spezifische technische Aufgabenstellung ungeeigneter Zielgrößen.

3.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der Energieeffizienz als initiale Zielgröße im Produktentstehungsprozess. Diese Objektivierung erfordert die Ausrichtung der Methode auf eine Unterstützung des Entwicklers als wesentliches Element des Handlungssystems bei Zielverständnisaufbau und Zielpriorisierung im Rahmen der Aktivitäten *Profifindung* und *Projektierung*.

Basierend auf den in Abschnitt 3.1 geschilderten Lücken im Stand der Forschung beschäftigt sich diese Arbeit mit einer Unterstützung des Produktentwicklers bei der systematischen Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße um das Zielverständnis sowie die Konsistenz und Formulierung der Ziele zu verbessern und eine frühe Identifikation relevanter Betrachtungsräume sowie entsprechender geeigneter Systemgrenzen zu ermöglichen. Dadurch soll ein frühes Erkennen potenzieller Chancen und Risiken ermöglicht werden.

Im Rahmen einer **Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße** (Kapitel 5) werden zunächst die industriepraktischen Erfahrungen im Umgang mit der Energieeffizienz erfasst. Dabei wird auch die Praxisrelevanz der im Stand der Forschung identifizierten Defizite überprüft.

Basierend auf den Erkenntnissen wird ein methodisches Vorgehen entwickelt, mithilfe dessen der Entwickler ausgehend von dem initialen Ziel generischer Energieeffizienz systematisch die wesentlichen Zielaspekte identifizieren und abgrenzen sowie entsprechende Kenngrößen ableiten kann und somit bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte maßgeblich unterstützt wird.

Im Kapitel **Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße** (Kapitel 6) wird ein entsprechender Ansatz zur systematischen und objektivierenden Handhabung der Energieeffizienz erarbeitet. Hier gilt es die unterschiedlichen zugrunde liegenden Motive eines Strebens nach Energieeffizienz sowie deren Ausprägung mithilfe eines geeigneten Vorgehens zu identifizieren. Dabei wird insbesondere die Relevanz der Energieeffizienz in Abhängigkeit der unterschiedlichen Motivausprägungen sowie spezifischer Nutzenprofilmerkmale differenziert bewertet. Durch das Bereitstellen einer geeigneten Darstellung dieser Zusammenhänge werden die Entscheider bei der Beurteilung der Relevanz und des damit verbundenen Wertschöpfungspotenzials unterstützt. Auf diesem Weg können Empfehlungen bezüglich einer frühzeitigen Fokussierung wesentlicher Betrachtungsräume erfolgen und eine frühe Abschätzung

zu erwartender aktivitätenspezifischer Ressourcenbedarfe für die Zielerreichung ermöglicht werden. Ein Schwerpunkt der Betrachtung liegt hierbei auf der Energieeffizienz in der Produktnutzungsphase.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Systematisierung wird im Rahmen der **Operationalisierung der Energieeffizienz als Zielgröße** (Kapitel 7) ein neuer Ansatz zur Erstellung von Energieeffizienz-Kenngrößen entwickelt, deren spezifischer Einsatzzweck die Quantifizierung von Energieeffizienz-Zielen für die Produktnutzungsphase ist. Bei der Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentwicklung sind –insbesondere für den Zweck der späteren Verifizierung (als einem Teil Validierung) – eine präzise Definition des jeweiligen Zielverständnisses sowie die Quantifizierung der Ziele eminent wichtig. Um die Energieeffizienz überhaupt nutzenprofilgerecht adressieren und quantitativ bewerten zu können, bedarf es hierbei Kenngrößen, die neben den energetischen Aspekten auch den Grad des mit der Energie erzeugten Nutzens beschreiben. Eine Vergleichbarkeit von Zielgrößen für Produkte unterschiedlichen Nutzenprofils bietet keinen Mehrwert und wird daher nicht angestrebt. Somit ist die quantitative Abbildung des wesentlichen Produktnutzens zur Beschreibung der Energieeffizienz und primär zur Beschreibung von entsprechenden Zielgrößen eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit.

Schließlich werden basierend auf den zuvor erarbeiteten Ansätzen der Systematisierung und Operationalisierung **Vorgehensmodell und Referenzmodell** (Kapitel 8) im Sinne eines durchgängigen Handlungsleitfadens entwickelt, welche den Produktentwickler bei der differenzierten Bewertung sowie dem Aufbau eines projektspezifischen Verständnisses der Zielgröße Energieeffizienz unterstützen und somit die Grundlage für die Erstellung von quantitativen Zielgrößen bilden. Die entwickelten Modelle werden in dem methodischen Rahmenwerk des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM) umgesetzt. Abschließend wird eine softwarebasierte Umsetzung der Methode in einem Werkzeug (Kapitel 9) entwickelt, um eine Anwendung zum Zweck einer Validierung der Methode zu ermöglichen. Diese erfolgt im Rahmen von validierenden Studien im industriepraktischen Entwicklungsumfeld.

3.3 Forschungsfragen

Basierend auf der formulierten Zielsetzung dieser Arbeit sowie unter Berücksichtigung und Verwendung des vorgestellten Stands der Forschung, werden im Folgenden vier Forschungsfragen formuliert. Die Beantwortung der Forschungsfragen dient einer Erfüllung der Zielsetzung und stellt den wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag der Arbeit dar.

Die erste Forschungsfrage beschreibt zunächst die Untersuchung des industriepraktischen Umgangs mit der Zielgröße Energieeffizienz im Kontext der Produktentwicklung.

1. Welche Auswirkungen hat ein nicht-standardisiertes Vorgehen auf Verständnis und Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße?

Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen, widmet sich die zweite Forschungsfrage der Systematisierung einer Verwendung der Zielgröße Energieeffizienz im Kontext der Produktentstehung.

2. Wie kann die Energieeffizienz als Zielgröße systematisch berücksichtigt werden?

- Welche Aspekte der Energieeffizienz müssen bei der Entwicklung der Zielgröße berücksichtigt werden?
- Wie kann die Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße bewertet werden?
- Wie können die Motive für die Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße identifiziert werden?
- Wie können geeignete Systemgrenzen für die Betrachtung der Energieeffizienz als Zielgröße frühzeitig definiert werden.

Mithilfe der Ergebnisse der Systematisierung thematisiert die dritte Forschungsfrage anschließend das Vorgehen einer angemessenen Operationalisierung der Zielgröße Energieeffizienz.

3. Wie kann die Energieeffizienz als Zielgröße angemessen quantifiziert werden?

- Welche Merkmale können zur Quantifizierung der Energieeffizienz als Zielgröße herangezogen werden?
- Wie können diese Merkmale in eine aussagekräftige Zielgröße überführt werden?

Abschließend behandelt die vierte Forschungsfrage die Umsetzung der zuvor erarbeiteten Ansätze in einem durchgängigen methodischen Vorgehen.

4. Wie können die entwickelten Ansätze in einem methodischen Vorgehen integriert werden?

4 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen im Rahmen der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der Design Research Methodology (DRM)²⁶³ nach BLESSING UND CHAKRABARTI. Entsprechend gliedert sich die Arbeit in vier aufeinander aufbauende Schritte zur systematischen Erarbeitung eines wissenschaftlichen Mehrwerts (Abbildung 20).

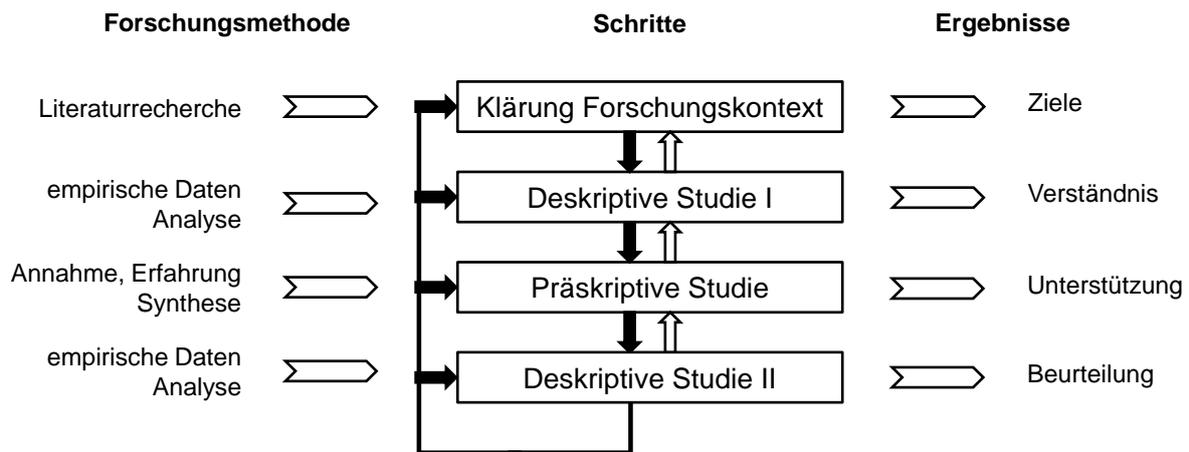


Abbildung 20: Schematische Darstellung des DRM-Vorgehens nach BLESSING UND CHAKRABARTI.²⁶⁴

Dies sind die Klärung des Forschungsbedarfs (Research Clarification), eine daran ausgerichtete deskriptive Studie (Descriptive Study), eine auf den Erkenntnissen aus der deskriptiven Studie basierende präskriptive Studie (Prescriptive Study) sowie eine erneute deskriptive Studie zur validierenden Beurteilung der Eignung des entwickelten Modells oder methodischen Ansatzes.

Aufbauend auf einer Untersuchung des relevanten Stands der Forschung sowie der Ableitung identifizierter Forschungsbedarfe, werden die Ziele der Arbeit formuliert. Anschließend wird im Rahmen einer empirischen Untersuchung das Verständnis für die im industriepraktischen Entwicklungsumfeld relevanten Fragestellungen bei der Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße vertieft und die konkreten Handlungsbedarfe identifiziert. Zusätzlich werden dabei bereits entwickelte Ansätze und vermutete Zusammenhänge auf Relevanz und Zustimmung seitens der befragten Entwicklungsingenieure überprüft. Diese Untersuchung wird mittels eines

²⁶³ Vgl. Blessing und Chakrabarti 2009

²⁶⁴ Nach Blessing und Chakrabarti 2009, S.15

standardisierten Fragebogens im Rahmen einer anonymisierten Online-Befragung durchgeführt. Die Stichprobenauswahl erfolgt dabei teilzufallsgesteuert.

Basierend auf den im Rahmen der empirischen Studie gewonnenen Erkenntnissen, werden erfahrungsbasierte und annahmenbehaftete vorgehensmethodische Ansätze zur Systematisierung und Operationalisierung entwickelt, welche anschließend zu einem Vorgehensmodell zusammengefasst werden. In einem weiteren Schritt wird das entwickelte Modell an mehreren Studien in industriepraktischen Entwicklungsprojekten validiert.

5 Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße

In diesem Kapitel wird untersucht wie die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentwicklung im industriepraktischen Entwicklungskontext wahrgenommen wird. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Untersuchung soll in den anschließenden Kapiteln eine entsprechende methodische Unterstützung erarbeitet und vorgestellt werden. Die Durchführung der Untersuchungen orientiert sich im Wesentlichen an den Empfehlungen aus dem Werk "Interview und schriftliche Befragung - Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung" von MAYER²⁶⁵.

5.1 Vorgehen

Um Ausschnitte der praktischen Realität in der Produktentwicklung empirisch untersuchen zu können, bedarf es initialer Vermutungen über Zusammenhänge, die auf Basis theoretischer Vorüberlegungen aufgestellt werden.²⁶⁶ Diese theoretischen Vorüberlegungen basieren wiederum auf Beobachtungen aus Literatur und Praxis und bilden somit den Basissatz. Im Rahmen dieser Arbeit dienen die im Stand der Forschung gesammelten und verdichteten Erkenntnisse als Basissatz für die weitere Forschung und begründen die in Abschnitt 5.2 formulierten Hypothesen.

Die zu untersuchenden Aussagen müssen nach MAYER zwei grundsätzliche Anforderungen erfüllen: Zum einen muss ein empirischer Bezug gegeben sein, die Aussagen müssen sich also auf erfahrbare Realitäten oder Sachverhalte beziehen. Zum anderen müssen sie falsifizierbar, also praktisch widerlegbar sein, um Tautologien oder Existenzaussagen auszuschließen.

Insbesondere im Sinne einer qualitativen Forschung, ist es wichtig, dass eine klare Vorstellung über die Fragestellungen entwickelt wird, aber die Forschung dennoch „offen bleibt für neue und im besten Fall überraschende Erkenntnisse“²⁶⁷. In diesem Sinne können qualitativ erhobene Daten auch größtenteils quantitativ geführte Untersuchungen und Daten ergänzen und die Erkenntnisse damit vertiefen.²⁶⁸

²⁶⁵ Mayer 2012

²⁶⁶ Vgl. Mayer 2012, S.18

²⁶⁷ Flick 1999, S.63 nach Mayer 2012

²⁶⁸ Vgl. Mayer 2012, S.27

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Erhebung von empirischen Daten eine quantitative Befragung durchgeführt. Diese erfolgt mittels eines standardisierten Fragebogens. Für einen standardisierten Fragebogen bedarf es konkreter Fragestellungen zum Messen der zu untersuchenden Merkmale bzw. Variablen, um diese zu operationalisieren.

Die Auswahl der Stichprobe als möglichst repräsentativer Anteil an der Grundgesamtheit kann zufallsgesteuert oder nicht zufallsgesteuert erfolgen. So sollen die abgefragten Eigenschaften sowie deren Verteilung innerhalb der Stichprobe möglichst der der Grundgesamtheit entsprechen, sodass valide Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Befragung gezogen werden können. Der Vorteil einer reinen Zufallsauswahl der Stichprobe besteht in der hohen Wahrscheinlichkeit einer Übereinstimmung der Merkmale in Grundgesamtheit und Stichprobe, wobei keinerlei Kenntnisse über die tatsächliche Zusammensetzung der Grundgesamtheit notwendig sind, wenn der Stichprobenumfang ausreichend groß ist.

Die Stichprobenauswahl erfolgt im Rahmen dieser Arbeit teilweise zufallsgesteuert. Zunächst erfolgt eine Auswahl von 30 Personen, deren Zugehörigkeit zur Grundgesamtheit (Maschinenbauingenieur in der Produktentwicklung von Industrieunternehmen) bekannt ist, wobei auf eine ausreichende Repräsentation unterschiedlicher Branchen geachtet wird. Die Empfänger der Fragebogen werden zusätzlich aufgefordert, die Fragebögen an weitere Entwicklungsingenieure (möglichst mit einer Affinität zur Fragestellung bezüglich Energieeffizienz als Zielgröße) weiterzuleiten, was wiederum eine teilweise zufallsgesteuerte Erweiterung der Stichprobe bedeutet, eine Erweiterung der ursprünglichen Branchen- und Unternehmensauswahl jedoch einschränkt.

Die Umfrage dient der Erhebung von empirischen Daten für ein besseres Verständnis des tatsächlichen Umgangs mit der Zielgröße Energieeffizienz in der Praxis. Basierend auf den Erkenntnissen aus der empirischen Erhebung sollen die wesentlichen methodisch zu unterstützenden Entwicklungsschritte identifiziert sowie dahingehende Hypothesen verifiziert oder falsifiziert werden. Neben der Erfassung allgemeiner Angaben zum beruflichen Hintergrund der Befragten und dem Umfang ihrer Erfahrung mit der Zielgröße Energieeffizienz, werden ihre Erfahrungen hinsichtlich

- dem allgemeinen Umgang mit der Zielgröße Energieeffizienz
- der Bewertung der spezifischen Wichtigkeit der Zielgröße Energieeffizienz
- einer Berücksichtigung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials der Energieeffizienz-Ziele für die Projektplanung
- der Formulierung der Energieeffizienz als Zielgröße

- einer Berücksichtigung unterschiedlicher Energieeffizienzzielen zugrunde liegender Motive

abgefragt.

5.2 Hypothesen

Die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung, wie sie in den jeweiligen Zwischenfazits zusammengefasst sind, sowie der dabei identifizierte Forschungsbedarf, sollen teilweise zusätzlich hinsichtlich ihrer Relevanz in der industriellen Entwicklungspraxis untersucht werden. Hierfür werden fünf Hypothesen formuliert, die mittels einer empirischen Erhebung unter Produktentwicklern überprüft werden sollen:

1. Es besteht genereller Bedarf an einer gezielten Unterstützung des Entwicklers im Umgang mit der Zielgröße Energieeffizienz.
2. Es besteht Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung der projektspezifischen Wichtigkeit der Energieeffizienz als Zielgröße.
3. Es besteht Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung des projektspezifischen Potenzials hinsichtlich einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße.
4. Die Formulierung der Zielgröße Energieeffizienz ist in der Praxis häufig unzureichend präzise und nicht messbar.
5. Die unterschiedlichen Motivationen, die einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße zugrunde liegen, lassen sich aus einer Kombination von fünf Basismotiven unterschiedlicher Ausprägung beschreiben: *ökologische, ökonomische, technische-funktionale, außendarstellungsbezogene* sowie *rechtliche* Motive.

Da die zu untersuchenden Merkmale bei den ersten vier Hypothesen theoretische Begriffe (wie beispielsweise die Erfahrung mit der Handhabung der Zielgröße Energieeffizienz) betreffen, werden diese nach einer dimensionalen Analyse aufgelöst.²⁶⁹ Zur Erfassung der durch die dimensionale Analyse ermittelten

²⁶⁹ Vgl. Mayer 2012, S.59

Teildimensionen bedarf es dann im Rahmen der Befragung jeweils einer oder mehrerer Fragen. Die dimensionale Auflösung ist im Folgenden dargestellt und orientiert sich in ihrer Struktur an den zuvor formulierten Hypothesen:

1. Genereller Bedarf an Unterstützung im Umgang mit Energieeffizienz
 - Nicht-standardisierte Handhabung
 - Fehlende methodische Unterstützung
 - Verantwortung für Verständnis und Formulierung liegt bei Entwickler
2. Bedarf an Unterstützung einer Bewertung der Relevanz
 - Relevanz lässt sich bewerten
 - Relevanz lässt sich vergleichend zu anderen Zielen bewerten
 - Relevanz lässt sich vergleichend zu früheren Projekten bewerten
 - Relevanzbewertung findet nicht statt
 - Relevanz wird nicht im Voraus erkannt
 - Bewertung muss häufig korrigiert werden
 - Relevanz wird erst im laufenden Projekt erkannt
3. Bedarf an Unterstützung einer Bewertung des Potenzials
 - Betrachtung des Potenzial findet nicht statt
 - Potenzial wird bei Ziel-Priorisierung nicht berücksichtigt
 - Technisches Potenzial wird nicht bewertet
 - Wirtschaftliches Potenzial wird nicht bewertet
4. Formulierung der Energieeffizienz ist unzureichend präzise und nicht messbar
 - Messbarkeit und Überprüfbarkeit der Zielerreichung
 - Verständlichkeit und Aussagekraft der Formulierung
 - Ziel ist nicht verständlich
 - Formulierung vermittelt keine Begründung des Ziels
 - Formulierung erfolgt qualitativ
 - Formulierung erfolgt mittels des energetischen Wirkungsgrads
 - Zielsetzung klärt nicht die Systemgrenzen

Auf Basis dieser dimensionalen Auflösung werden anschließend im Abschnitt 5.3 Fragen formuliert, deren Antworten Rückschlüsse bezüglich der tatsächlichen Verhältnisse in der Entwicklungspraxis ermöglichen sollen.

Die fünfte Hypothese bedarf keiner dimensionalen Auflösung. Einige der fünf Basismotive werden jedoch in der Befragung detaillierter ausgeführt um ihre Relevanz unabhängig von den übergeordneten abstrakteren Begriffen beurteilen zu lassen.

5.3 Schriftliche Befragung

Zur Überprüfung der Hypothesen wird eine schriftliche Befragung mithilfe eines Online-Fragebogens durchgeführt. Hierfür wird die Online-Umfrageplattform LimeService²⁷⁰ genutzt, die einen einfachen und individuellen Aufbau von Fragen und Fragengruppen unterschiedlicher Form ermöglicht. Die Umfrage erfolgt anonym mittels einer an die Teilnehmer per Email gesendeten Direktverknüpfung zur Umfrage. Es werden keine persönlichen Zugangsschlüssel generiert, um eine Weiterleitung der Umfrage durch die Teilnehmer zu ermöglichen und die Hemmschwelle zur Teilnahme zu senken.

Mithilfe der Durchführung eines Pretests mit drei Teilnehmern²⁷¹ wird eine Bearbeitungsdauer von ca. 7min ermittelt sowie die Fragestellungen hinsichtlich Verständlichkeit und Eindeutigkeit überprüft und überarbeitet. Auf Basis der Empfehlungen für die Durchführung von Befragungen mittels standardisiertem Fragebogen nach MAYER beginnt die Befragung mit einfachen, den Befragten persönlich ansprechenden und einbindenden Fragen, sogenannten Eisbrecherfragen. Hierfür wird die Frage nach dem Umfang der Erfahrung der Befragten gewählt. Die demografischen Fragen zu Alter, Berufserfahrung, Branchenzuordnung etc. werden dagegen am Ende der Befragung gestellt.

Ein Großteil der Fragen wird als geschlossene Fragen formuliert, um die Auswertung mit einem angemessenen Aufwand zu ermöglichen und eine unschärfebehaftete retrospektive Kategorisierung von Antworten während der Auswertung zu umgehen. Da bei Fragen nach Vollständigkeit (vgl. letzte Hypothese) keine erschöpfende Aufzählung der Antwortalternativen möglich ist, wird die entsprechende Frage halb offen gestellt²⁷². Dies bedeutet, dass eine Kategorie „Sonstiges“ vorgesehen wird, in welcher der Befragte ergänzenden Antwortalternativen wie bei einer offenen Frage selbst formulieren kann und soll.

Vier Fragengruppen entsprechend der vier ersten Hypothesen zielen auf die Erfassung der praktischen Erfahrungen der Befragten. Für die indirekte Erfassung solcher hypothetischer Konstrukte bietet sich eine indirekte Messung mittels einer monopolen Skala mit verbaler Umschreibung aller Antwortabstufungen an (vgl. Abbildung 21). Um neutrale Antworten zu vermeiden und eine Entscheidungsflucht der Befragten zu mindern, wird eine gerade Anzahl von Antwortvorgaben verwendet. Um aber den Befragten die Möglichkeit zu geben die Beantwortung einzelner Fragen

²⁷⁰ <http://www.limeservice.com/en/>

²⁷¹ Wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK – Institut für Produktentwicklung

²⁷² Nach Mayer 2012 auch als Hybridfrage bezeichnet

zu umgehen, wenn sie sich dazu nicht in der Lage sehen, und damit eine zufällige Wahl der Antwortkategorie zu verhindern²⁷³, ist eine zusätzliche Antwortoption „keine Antwort“ gegeben.

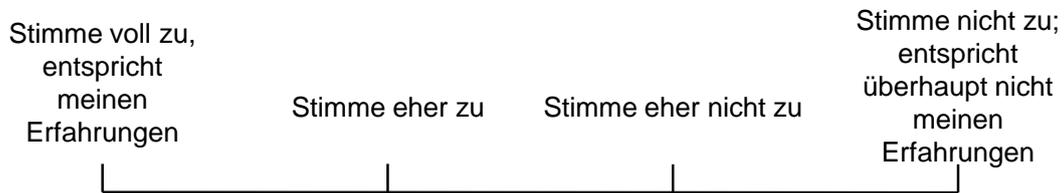


Abbildung 21: Monopolare Skala mit verbaler Umschreibung aller Antwortabstufungen.

Unter verschiedenen übergeordneten Fragen nach den persönlichen Erfahrungen werden jeweils drei bis sechs Aussagen formuliert, die die dimensionale Auflösung aus Abschnitt 5.2 abbilden. Die Befragten werden gebeten die Übereinstimmung einzelner Aussagen mit ihren persönlichen Erfahrungen jeweils auf der in Abbildung 21 dargestellten monopolarer Skala zu bewerten. Im Folgenden werden die Fragen aus der dimensional Auflösung der Hypothesen abgeleitet und in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: Abgeleitete Fragen aus der dimensional Auflösung der Hypothesen.

Dimensionale Auflösung	Fragen und zu beurteilende Aussagen
1. Genereller Bedarf an Unterstützung im Umgang mit Energieeffizienz	Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen zum Umgang mit der Energieeffizienz als Zielgröße?
Nicht-standardisierte Handhabung	Die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolgt nicht-standardisiert.
Fehlende methodische Unterstützung	Die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolgt ohne methodische Hilfsmittel.
Verantwortung für Verständnis und Formulierung liegt bei Entwickler	Es ist Aufgabe des Entwicklers, die Zielgröße Energieeffizienz im Projektkontext richtig zu verstehen und zu formulieren.
2. Bedarf an Unterstützung einer Bewertung der Relevanz	Bitte beurteilen Sie, inwiefern die verschiedene Wichtigkeit der Zielgröße Energieeffizienz in unterschiedlichen Projekten berücksichtigt wird.
Relevanz lässt sich vergleichend zu anderen Zielen bewerten	Die Wichtigkeit der Energieeffizienz lässt sich vergleichend mit der Wichtigkeit anderer Ziele bewerten.
Relevanz lässt sich vergleichend zu früheren Projekten bewerten	Die Wichtigkeit der Energieeffizienz lässt sich vergleichend zu ihrer Wichtigkeit in früheren Projekten bewerten.
Relevanzbewertung findet nicht statt	Zu Projektbeginn findet eine Bewertung der Wichtigkeit der Energieeffizienz statt.

²⁷³ Vgl. Schnell 1999

Dimensionale Auflösung	Fragen und zu beurteilende Aussagen
Bewertung muss häufig korrigiert werden	Diese Bewertung wird im weiteren Projektverlauf häufig erheblich korrigiert.
Relevanz wird erst im laufenden Projekt erkannt	Die tatsächliche (Un-)Wichtigkeit der Energieeffizienz wird häufig erst während der Projektbearbeitung erkannt.
3. Bedarf an Unterstützung einer Bewertung des Potenzials	Wie beurteilen Sie die Berücksichtigung des Potenzials bzgl. der Energieeffizienz für die Zielstellung?
Betrachtung des Potenzials findet nicht statt	Zu Projektbeginn wird das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz explizit untersucht.
Potenzial wird bei Ziel-Priorisierung nicht berücksichtigt	Das Potenzial der Energieeffizienz wird bei der Priorisierung der EE-Ziele berücksichtigt.
Technisches Potenzial wird nicht bewertet	Das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz wird technisch bewertet.
Wirtschaftliches Potenzial wird nicht bewertet	Das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz wird wirtschaftlich bewertet.
4. Formulierung der Energieeffizienz ist unzureichend präzise und nicht messbar	Welche Erfahrungen haben Sie mit der Formulierung der Zielgröße Energieeffizienz bisher gemacht?
Messbarkeit und Überprüfbarkeit der Zielerreichung	Die Zielgröße Energieeffizienz ist messbar und damit eindeutig auf Zielerreichung überprüfbar.
Ziel ist nicht verständlich	Die Formulierung der Zielsetzung bzgl. Energieeffizienz ist gut verständlich.
Formulierung vermittelt keine Begründung des Ziels	Die Formulierung fördert ein zielführendes Verständnis der Energieeffizienz für die Entwicklungsaufgabe.
Formulierung erfolgt qualitativ	Ziele bzgl. Energieeffizienz werden häufig nur qualitativ beschrieben.
Formulierung erfolgt mittels des energetischen Wirkungsgrads	Die Energieeffizienz wird meist mithilfe des energetischen Wirkungsgrads beschrieben.
Zielsetzung klärt auch die Systemgrenzen	Mit den Energieeffizienz-Zielen werden auch die zu berücksichtigenden Systemgrenzen explizit geklärt.

Basierend auf der fünften Hypothese wird eine weitere Frage gestellt. Diese soll aus Sicht der industriepraktischen Produktentwicklung die aus dem Stand der Forschung und Erfahrungswerten entwickelten Basismotive, mittels welcher eine Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße begründet sein kann, beurteilen. Diese Frage wird halboffen formuliert (Vgl. Tabelle 4). Hierbei wird keine monopolare Skala verwendet, sondern die Zustimmung zu einzelnen Motiven und ausgewählten Beispielen mittels der Antwortoptionen *ja*, *nein*, und *unsicher* abgefragt. Zusätzlich werden die Befragten aufgefordert, die Liste gegebenenfalls um weitere Motive zu ergänzen.

Tabelle 4: Teiloffene Frage zur Beurteilung der fünf Basismotive.

Basismotive	Beispiele
Welche Aspekte sollten bei einer Bewertung der Wichtigkeit der Energieeffizienz als Zielgröße berücksichtigt werden?	
Ökologische Aspekte	Energieaufwand, Energieart, Emissionen,...
Wirtschaftliche Aspekte	Energiekosten, finanzielle Förderungen
Technische oder funktionale Aspekte	Leistungsgrenzen der Energiequelle oder des Anwenders, begrenzte Leistungsverfügbarkeit, thermische Belastungsgrenzen durch Abwärme, Kapazität und Mobilität eines Energiespeichers, etc.
Außendarstellung des Unternehmens	Marketing, Verwendung von Energieeffizienz-Labels, ...
Rechtliche Aspekte	Verpflichtende Labels, EU-Richtlinien, ...
Sonstiges	...

5.4 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Umfrage vorgestellt, grafisch aufbereitet und interpretiert.

Es werden 35 vollständige Datensätze aus 42 teilweise beantworteten Fragebögen extrahiert und ausgewertet. Mit den 35 ausgewerteten Fragebögen werden ebenfalls soziodemografische Angaben erhoben, die die Stichprobenauswahl beschreiben und die Repräsentativität der Erhebung bewertbar machen sollen. Die Befragten weisen im Durchschnitt ein Alter von ca. 37 Jahren auf, die Altersverteilung ist in Abbildung 22 dargestellt.

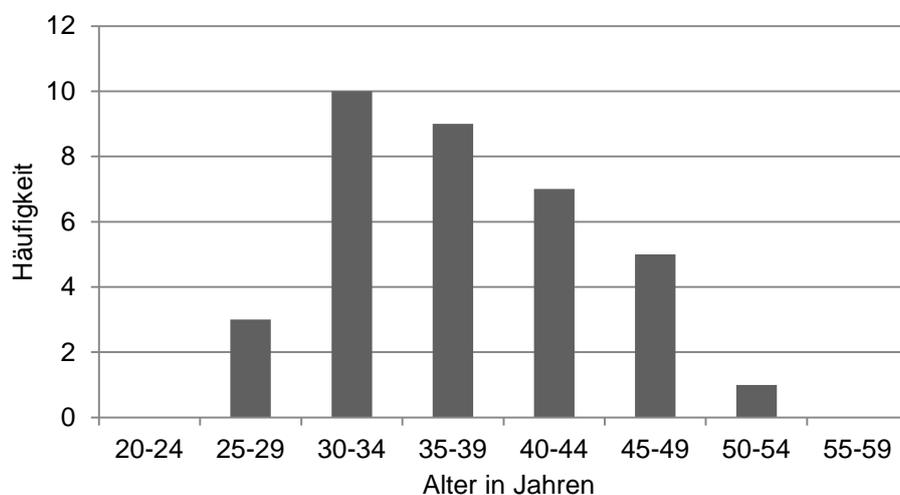


Abbildung 22: Altersverteilung der Befragungsteilnehmer.

Die Befragten gaben außerdem durchschnittlich einen Zeitraum relevanter Berufserfahrung von etwas über zehn Jahren an, die Verteilung der Berufserfahrung ist in Abbildung 23 dargestellt.

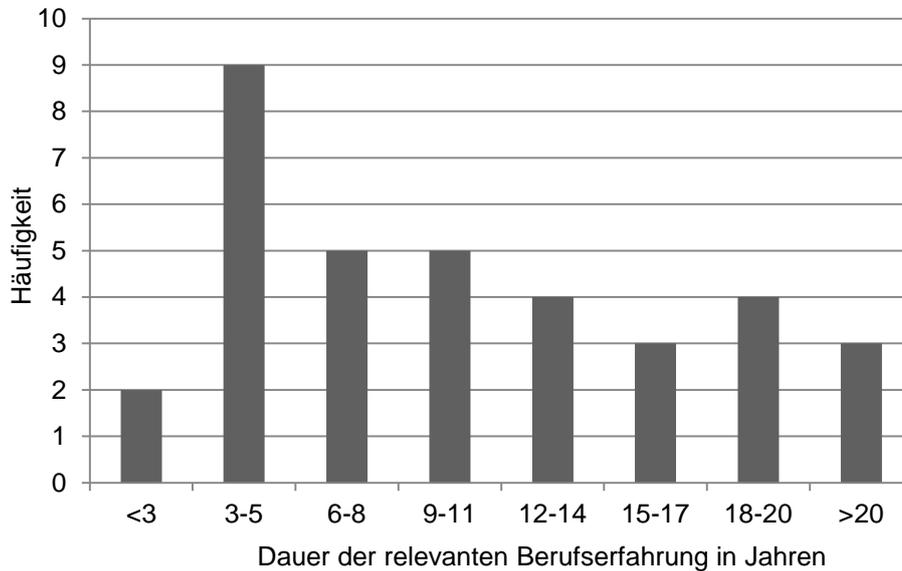


Abbildung 23: Verteilung der relevanten Berufserfahrung der Befragungsteilnehmer.

Die Zugehörigkeit der Befragten nach Branchen zeigt eine angemessenen homogene Verteilung, wie in Abbildung 24 dargestellt ist: Etwa ein Viertel der Befragten ordnen sich dem Automotive-Bereich (OEM) zu, jeweils etwa ein Fünftel der Befragten ordnen sich den Branchen Automotive-Zulieferer, handgeführte elektrische Geräte sowie haushaltsnahe Maschinen und Geräte zu. Vier der Befragten arbeiten im Energiesektor sowie fünf im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau. Einer der Befragten gibt als Branche unter Sonstiges „Medizintechnik“ an.

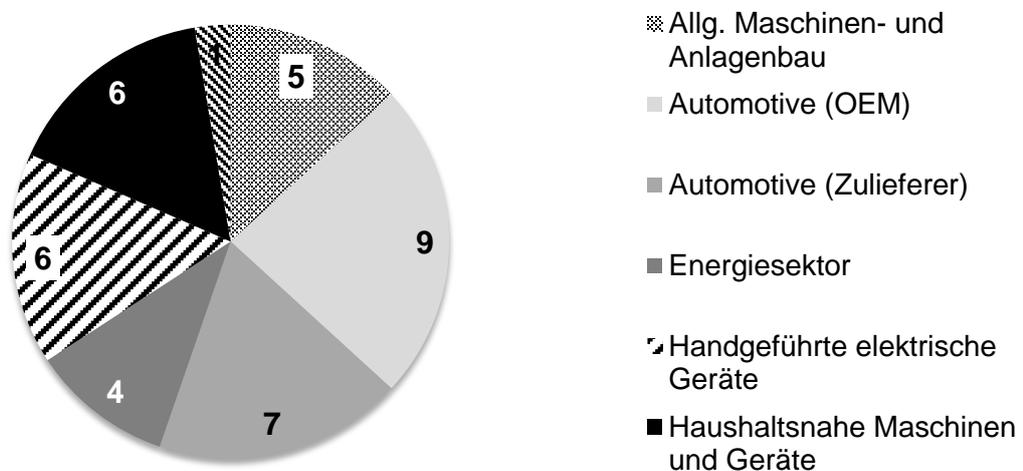


Abbildung 24: Verteilung der Branchenzugehörigkeit der Befragten Entwicklungsingenieure.

Die Fragebögen wurden an Personen in Entwicklungsabteilungen verschiedener Unternehmen und Branchen gesendet. Um eine zusätzliche Beurteilung von Repräsentativität und Aussagekraft der erhobenen Daten zu ermöglichen, wurde auch der jeweilige Tätigkeitsbereich abgefragt. Hierbei war eine Mehrfachzuordnung möglich. Danach bezeichnen sich 25 Befragte als Entwicklungsingenieure, zwölf als Konstrukteure, 21 als Projektmanager, drei haben eine Funktion als Gruppen- oder Abteilungsleiter und vier ordnen sich dem Bereich Versuch/Testing zu. Diese Verteilung ist in Abbildung 25 dargestellt.

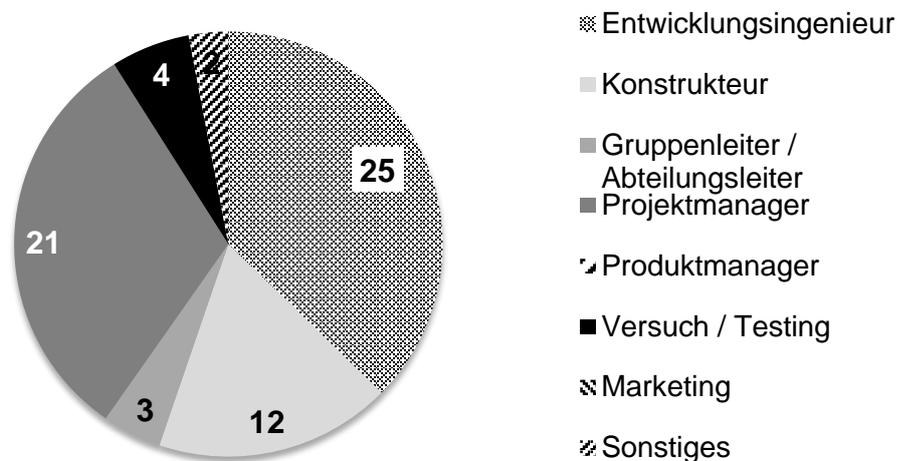


Abbildung 25: Verteilung der Tätigkeitsbereiche der Befragten. Hierbei waren Mehrfachzuordnung möglich.

Besonders interessant für eine Bewertung der Aussagekraft der Umfrage ist der Umfang der Erfahrung der Beteiligten mit der Zielgröße Energieeffizienz. So gaben die Befragten durchschnittlich an, in 5,5 Projekten beteiligt gewesen zu sein, in denen die Energieeffizienz eines der angestrebten Ziele war.²⁷⁴ Außerdem gaben die Befragten durchschnittlich eine Anzahl von 4,6 Projekten an, in welchen sie persönlich die Zielgröße Energieeffizienz für das zu entwickelnde Produkt zu berücksichtigen hatten. Die jeweiligen Verteilungen dieses speziellen Erfahrungsumfanges ist in Abbildung 26 dargestellt.

²⁷⁴ Tatsächlich ist von einer höheren Zahl auszugehen, da die Antwortmöglichkeit „>10 Projekte“ bei der Ermittlung des Mittelwertes nur mit 10 bewertet wird.

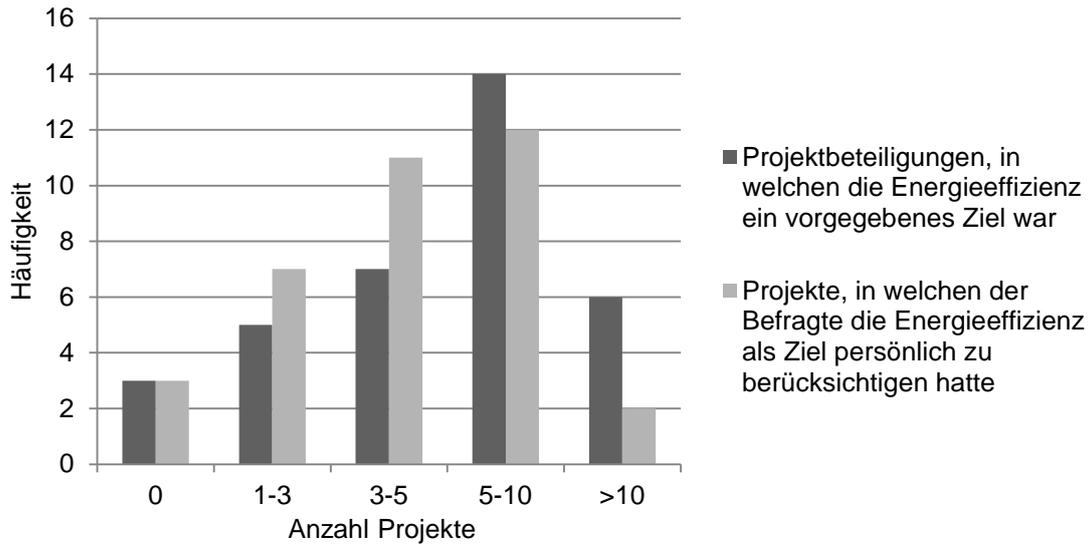


Abbildung 26: Verteilung der Projektbeteiligungen der Befragten, in welchen die Energieeffizienz ein allgemeines oder persönlich zu berücksichtigendes Ziel war.

1. Hypothese: „Es besteht Bedarf an einer gezielten Unterstützung des Entwicklers im Umgang mit der Zielgröße Energieeffizienz“

Die formulierte Hypothese „Es besteht Bedarf an einer gezielten Unterstützung des Entwicklers im Umgang mit der Zielgröße Energieeffizienz“ wird durch die erhobenen Daten gestützt (vgl. Abbildung 27). Über 90% der Befragten stimmen der Aussage zu, die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolge nicht-standardisiert. Wiederum über 80% der Befragten stimmen der Aussage zu, die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolge ohne methodische Hilfsmittel. Weiterhin betrachten knapp über 90% von ihnen es als ihre Aufgabe die Zielgröße Energieeffizienz im jeweiligen Projektkontext richtig zu verstehen und zu formulieren.

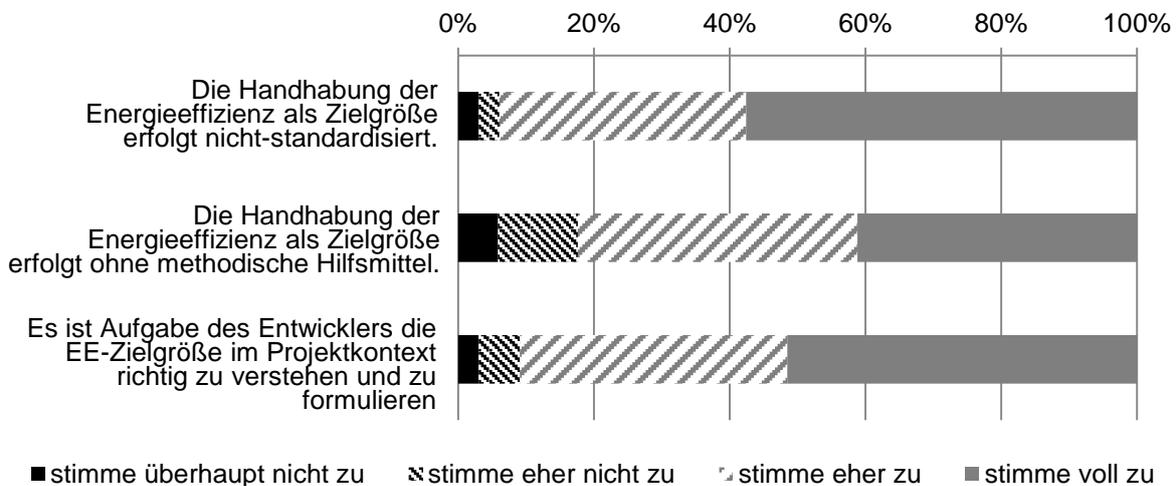


Abbildung 27: Verteilung der Antworten zu der Frage „Wie beurteilen Sie die folgenden Aussagen zum Umgang mit der Energieeffizienz als Zielgröße?“

Die Kombination dieser Aussagen, die in Abbildung 27 nochmals graphisch zusammengefasst ist, lässt den Schluss zu, dass im industriepraktischen Umfeld grundsätzlich Bedarf an einer systematischen Unterstützung des Produktentwicklers bei der Verwendung der Zielgröße Energieeffizienz existiert.

2. Hypothese: „Es besteht Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung der projektspezifischen Wichtigkeit der Energieeffizienz als Zielgröße“

Die zweite Hypothese „Es besteht Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung der projektspezifischen Wichtigkeit der Energieeffizienz als Zielgröße“ lässt sich durch die erhobenen Daten prinzipiell stützen, jedoch nicht eindeutig klären (vgl. Abbildung 28). Knapp 60% der Befragten stimmen der Aussage, die Wichtigkeit der Energieeffizienz lasse sich vergleichend mit der Wichtigkeit anderer Ziele bewerten, nicht zu. Dabei geben knapp 50% an, dieser Aussage überhaupt nicht zustimmen zu können. Hingegen stimmen nur 15% der Aussage voll zu. Vergleichbar knapp fällt die Ablehnung der Aussage aus, die Wichtigkeit der Energieeffizienz lasse sich vergleichend zu ihrer Wichtigkeit in anderen bzw. früheren Projekten bewerten.

Da die Angaben explizit auf den Erfahrungen der Befragten beruhen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Einschätzung, die Wichtigkeit ließe sich nicht bewerten, auf die jeweiligen Erfahrungen beziehen und keine prinzipielle Ablehnung der Möglichkeit einer Bewertung per se bedeuten. Gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine dahingehende missverständliche Auffassung dieser Frage nicht ausgeschlossen werden kann.

Etwa dreiviertel der Befragten geben an, ihrer Erfahrung nach finde zu Projektbeginn keine Bewertung der Wichtigkeit der Zielgröße Energieeffizienz statt. Dafür gibt ein ähnlicher Anteil an, die Wichtigkeit würde im Verlauf des Projekts erheblich korrigiert. Da die absolute Anzahl an Antworten bei beiden Fragen gleich ist, liegt hier ein logischer Konflikt vor (vgl. Abbildung 28): Wenn zu Beginn keine Bewertung der Wichtigkeit stattfindet, lässt sich eine Änderung der Wichtigkeit in der Regel nur schwer feststellen. Daher stellt sich die Frage wie die Befragten zu ihrer Einschätzung der Erfahrungen gekommen sind. Es muss demnach davon ausgegangen werden, dass die identifizierten Veränderungen der Wichtigkeit sich auf implizite und persönliche initiale Bewertungen beziehen.

Wiederum knapp dreiviertel der befragten Entwicklungsingenieure stimmen der Aussage zu, die tatsächliche Wichtigkeit oder Unwichtigkeit der Energieeffizienz werde häufig erst während der Projektbearbeitung erkannt. Eine graphische Übersicht dieser Daten ist in Abbildung 28 dargestellt.

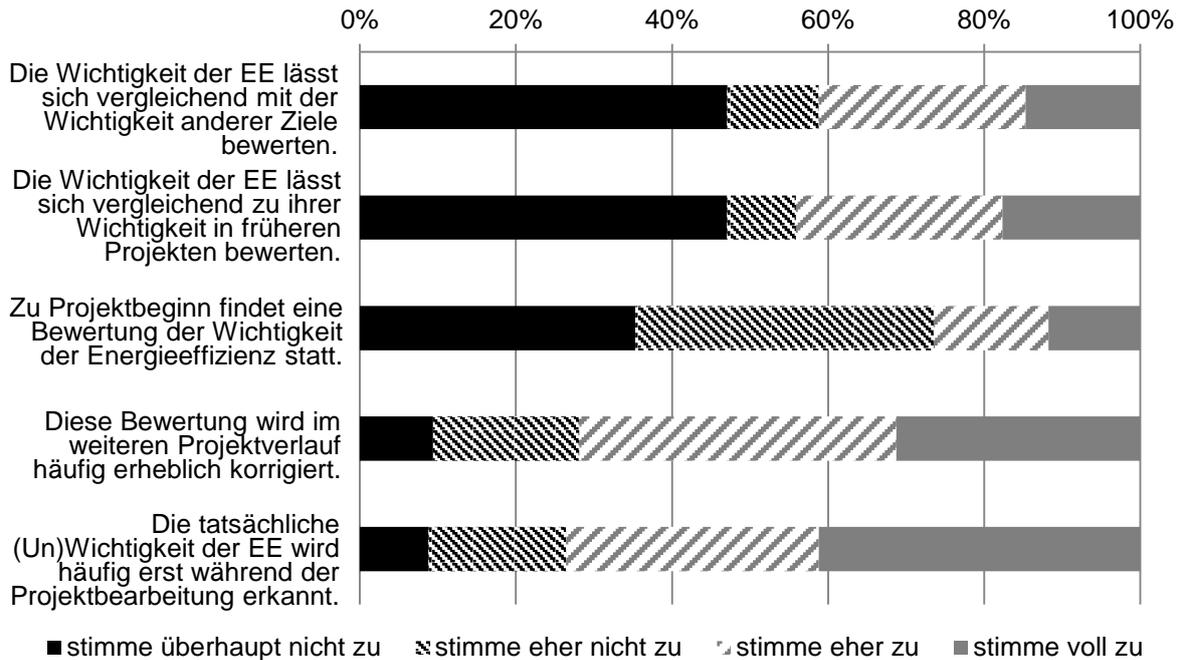


Abbildung 28: Verteilung der erfahrungsbasierten Angaben, zum praktischen Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung der projektspezifischen Wichtigkeit der Energieeffizienz.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Mehrheit der Projekte keine explizite Bewertung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße stattfindet. Zusätzlich wird bereits die Vergleichbarkeit der Relevanz per se kritisch betrachtet. Eine mögliche Erklärung hierfür ist das Fehlen einer für diesen Zweck geeigneten methodischen Unterstützung.

3. Hypothese: „Es besteht Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung des projektspezifischen Potenzials hinsichtlich einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße.“

Die dritte Hypothese, es bestehe Bedarf an einer Unterstützung der Bewertung des projektspezifischen Wertschöpfungspotenzials hinsichtlich einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße, wird durch die erhobenen Daten gestützt (vgl. Abbildung 29). So stimmen über zweidrittel der Befragten der Aussage, das Potenzial bezüglich der Energieeffizienz würde zu Projektbeginn explizit untersucht „eher nicht“ oder „überhaupt nicht“ zu. Entsprechend geben über 70% von ihnen an, es entspreche nicht ihrer Erfahrung, dass das Potenzial der Energieeffizienz bei der Priorisierung der Energieeffizienzziele berücksichtigt würde. Hingegen entspricht es der Erfahrung von über dreiviertel der Befragten, dass das Potenzial der Energieeffizienz technisch bewertet wird. Eine ebensolche Bewertung aus wirtschaftlicher Sicht erfolgt jedoch nur aus Sicht von unter 40% von ihnen. Diese Verhältnisse sind nochmals in Abbildung 29 zusammen gefasst.

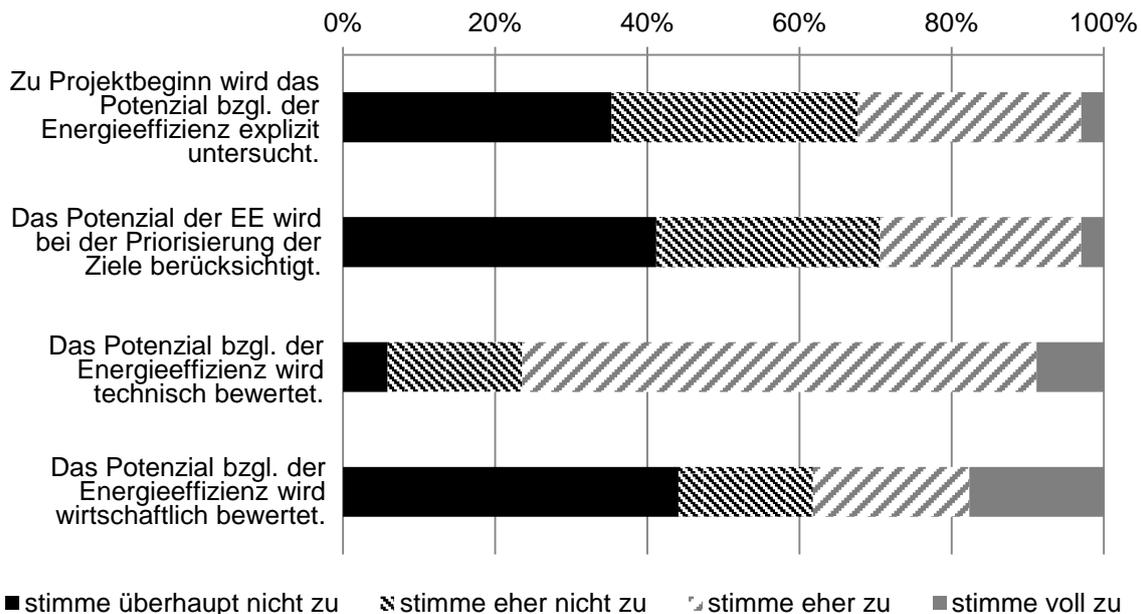


Abbildung 29: Verteilung der erfahrungsbasierten Angaben, zur Berücksichtigung des Potenzials der Energieeffizienz für die Zielstellung

Demnach lässt sich festhalten, dass eine explizite Berücksichtigung des Potenzials hinsichtlich der Energieeffizienzziele nicht stattfindet und dieses Potenzial entsprechend bei einer Zielpriorisierung nicht berücksichtigt werden kann. Im Gegensatz zum technischen Energieeffizienzpotenzial wird das wirtschaftliche Potenzial in der Regel nicht näher betrachtet.

4. Hypothese: „Die Formulierung der Zielgröße Energieeffizienz ist in der Praxis häufig unzureichend präzise und nicht messbar.“

Die vierte Hypothese, die Zielgröße Energieeffizienz sei in der Praxis häufig unzureichend präzise und nicht messbar formuliert, wird durch die Befragung ebenfalls gestützt (vgl. Abbildung 30). So geben über 60% der Befragten an, die Aussage, die Zielgröße Energieeffizienz sei messbar und damit eindeutig auf Zielerreichung überprüfbar, entspreche nicht ihren Erfahrungen. Zweidrittel der Befragten stimmen der Aussage, die Formulierung der Zielsetzung bezüglich Energieeffizienz sei gut verständlich, nicht oder überhaupt nicht zu. Ebenfalls über 60% der Befragten gaben an, dass die Formulierung der Energieeffizienzziele im Rahmen ihrer Erfahrung ein zielführendes Verständnis der Energieeffizienz im Kontext der Entwicklungsaufgabe nicht oder nur unzureichend fördere.

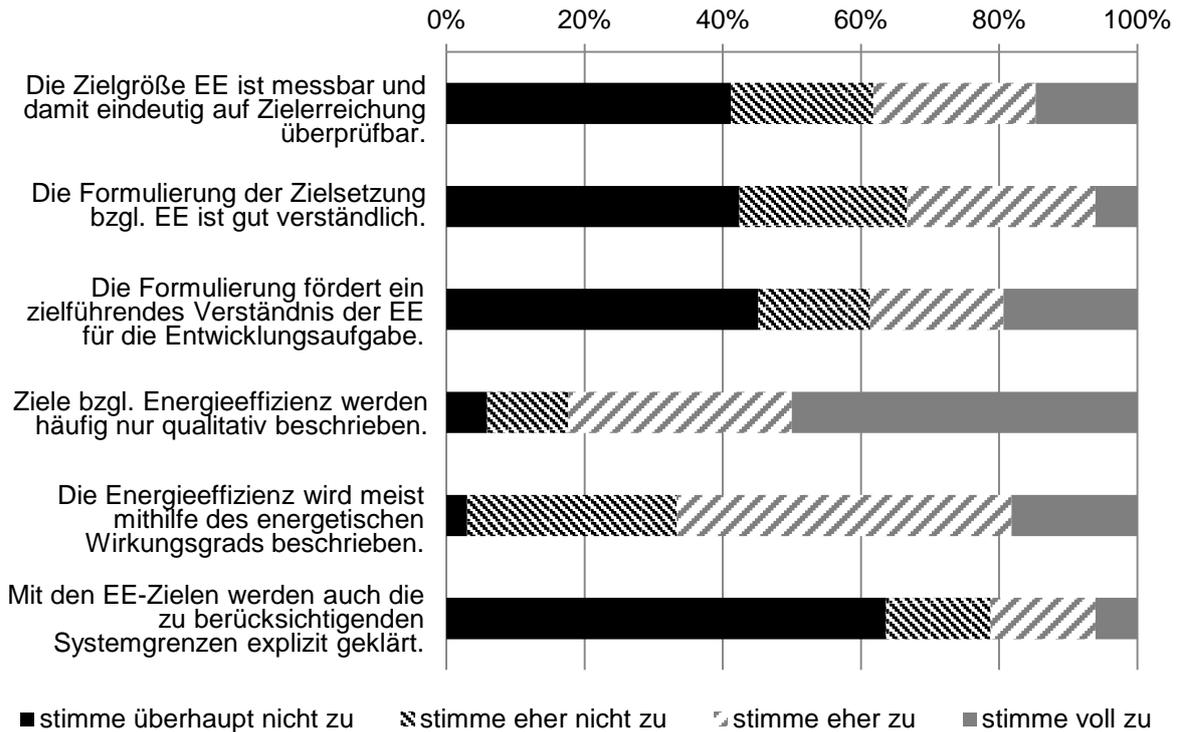


Abbildung 30: Verteilung der erfahrungsbasierten Angaben, zur Formulierung der Zielgröße Energieeffizienz in der betrieblichen Praxis.

Über 80% stimmen der Aussage zu, die Ziele bezüglich der Energieeffizienz würden häufig nur qualitativ beschrieben. Gleichzeitig geben jedoch zweidrittel der Befragten an, die Energieeffizienz würde meist mithilfe des energetischen Wirkungsgrads beschrieben. Dies lässt sich beispielsweise durch die in der Fragestellung verwendeten, nur subjektive Tendenzen ausdrückenden temporalen Adverbien bzw. Adjektive „meist“ und „häufig“ erklären. Von den knapp 80% der an der Befragung teilnehmenden Ingenieure, die der Aussage, mit den Energieeffizienzzielen würde auch die zu berücksichtigenden Systemgrenzen explizit geklärt, nicht zustimmen, geben wiederum etwa 80% an, dies entspräche sogar überhaupt nicht ihren Erfahrungen.

Die zu dieser Fragestellung erfassten Daten sind nochmals in Abbildung 30 dargestellt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Messbarkeit und Formulierung der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentwicklung mehrheitlich als schwierig empfunden werden, daher werden die Ziele in der Regel nur qualitativ formuliert, ohne jedoch dabei den Betrachtungsraum mittels gemeinsamer Systemgrenzen festzulegen.

5. Hypothese: „Die unterschiedlichen Motivationen, die einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße zugrunde liegen, lassen sich aus einer Kombination von fünf Basismotiven unterschiedlicher Ausprägung beschreiben“

Zur Überprüfung der fünften Hypothese, die unterschiedlichen Motivationen, die einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße zugrunde liegen, ließen sich aus einer Kombination von fünf Basismotiven unterschiedlicher Ausprägung beschreiben, werden ebendiese Basismotive durch den Befragten beurteilt (vgl. Abbildung 31). Dabei können die einzelnen Basismotive (*ökologische, ökonomische, technische-funktionale, Außendarstellungs-bezogene* sowie *rechtliche* Motive) sowie einzelne aufgeführte Teilmotive (wie zum Beispiel Mobilität als Teil des technisch-funktionalen Motivs) mittels *ja, nein, unsicher* hinsichtlich einer Zustimmung ihrer Berücksichtigung zur Relevanzbewertung der Energieeffizienz als Zielgröße beurteilt werden. Mit Zustimmungswerten von 89% bis 94% fällt diese Beurteilung für die ersten vier Motive (vgl. Abbildung 31) recht eindeutig aus. Weitere zwei Basismotive (Außendarstellung und rechtliche Aspekte) können mit jeweils etwa 70% Zustimmung und nur 6% Ablehnung ebenfalls als bestätigt betrachtet werden. Einzig die Berücksichtigung finanzieller Förderungen wird von den befragten Entwicklungsingenieuren kritisch betrachtet. Hier stimmen mit jeweils knapp einem Viertel von ihnen ebenso viele zu wie sie eine Berücksichtigung ablehnen, über die Hälfte der Befragten ist sich hierbei unsicher. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 31 nochmals graphisch zusammengefasst. Es fällt auf, dass die Zustimmung mit aus Ingenieurs-sicht zunehmender Abstraktheit der zu beurteilenden Motive oder Aspekte merklich abnimmt und die Unsicherheit in der Beurteilung steigt. Eine steigende Abstraktheit bedeutet eine Veränderung der Betrachtungsebene, auf welcher die Berücksichtigung von Marketingaspekten und finanziellen Förderungen zwar unternehmerisch eindeutig sinnvoll ist, dessen Notwendigkeit sich dem individuellen Entwickler jedoch eventuell nicht intuitiv erschließt.

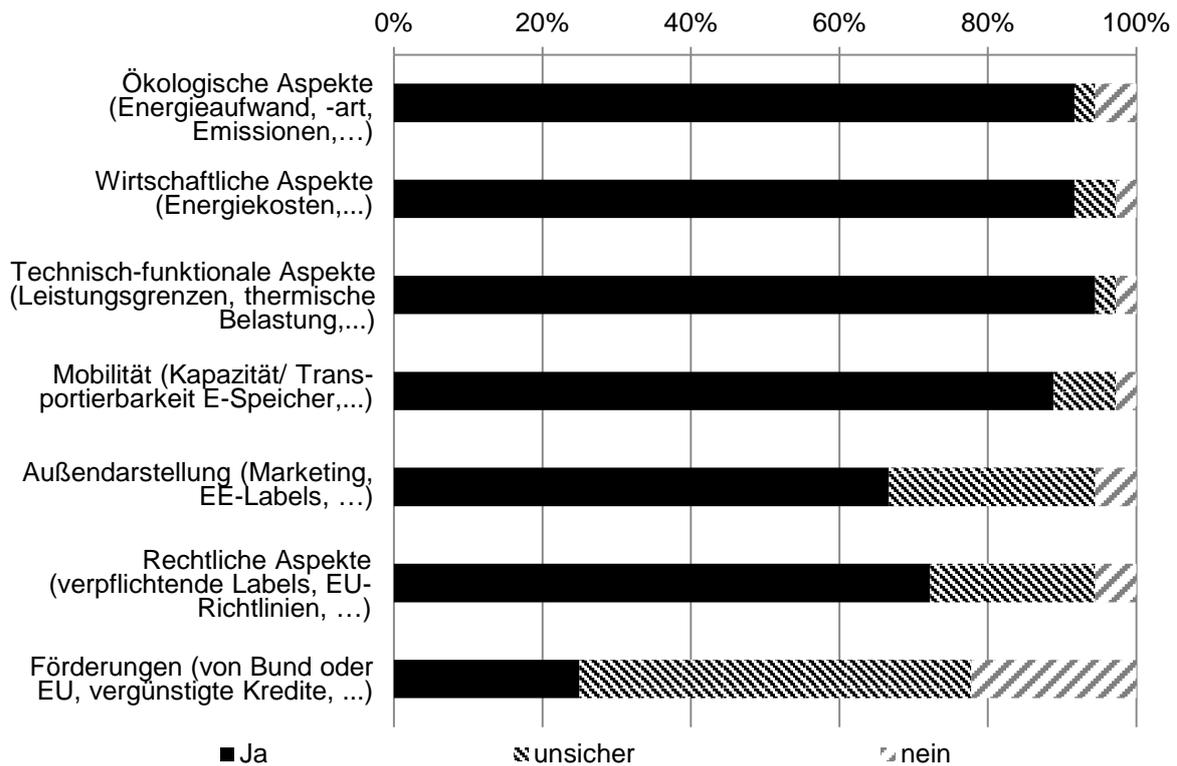


Abbildung 31: Verteilung der Zustimmung zu unterschiedlichen Motiven für eine Berücksichtigung bei der Relevanzbewertung der Energieeffizienz als Zielgröße.

Dabei muss klargestellt werden, dass die Befragten hierbei nicht die Wichtigkeit der einzelnen Aspekte selbst beurteilen, sondern lediglich die Richtigkeit ihrer Berücksichtigung bei der Beurteilung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz.

Als zusätzliche zu berücksichtigende Aspekte werden von den Befragten jeweils einmal genannt: „Ergonomie“, „Energiequalität“, „Soziale Aspekte“, „Möglichkeiten für Downsizing durch höhere Energieeffizienz“ sowie „Vergleich mit Wettbewerbern“. Die Aspekte Ergonomie und Downsizing sowie die zu verwendende Energieart sind bereits als ein Teil des technisch-funktionalen Motivs vorgesehen. Der „Vergleich mit Wettbewerbern“ stellt kein eigentliches Motiv für die Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße dar und wird daher nicht berücksichtigt. Die „sozialen Aspekte“ sind teilweise in den außendarstellungsbezogenen Motiven berücksichtigt, da eine Berücksichtigung darüber hinaus in einem wirtschaftlich handelnden Unternehmensumfeld nur in Ausnahmefällen relevant sein dürfte.

Das einzige Beurteilungskriterium, welches hinsichtlich einer Berücksichtigung ablehnend bewertet wird, ist *Förderungen*. Dieses ist jedoch nur ein Teilmotiv der ökonomischen Aspekte. Daher kann insgesamt eine mehrheitliche Zustimmung zu den vorgeschlagenen Basismotiven festgehalten werden.

Den gezeigten Ergebnissen aus der empirischen Studie soll zum Abschluss nochmals die Notwendigkeit einer möglichst differenzierten und richtigen Zielstellung gegenüber gestellt werden. Nach HALL ist nämlich „wichtiger als die Auswahl des richtigen Systems (...), zunächst die richtigen Ziele zu bestimmen. Denn wählt man falsche Ziele, dann löst man eine irrelevante Problemstellung; wählt man dagegen ein falsches System (auf der Basis richtiger Ziele), so wählt man letztlich nur ein nicht optimales System.“²⁷⁵

Zwischenfazit

Der im Rahmen der schriftlichen Befragung betrachtete Umfang einer Vielzahl unterschiedlicher individueller Erfahrungen aus Entwicklungsabteilungen verschiedener Industrieunternehmen und Branchen (Abbildung 24) bildet eine ausreichend breite Basis, auf welcher eine weitestgehende Verifizierung der zuvor aufgestellten Hypothesen erfolgt ist. Damit können Bedarfe für die in Kapitel 6 und 7 folgende Entwicklung einer methodischen Unterstützung sowie einer werkzeugseitigen Umsetzung in Kapitel 8 zur differenzierten Handhabung und quantitativen Formulierung der Energieeffizienz als Zielgröße abgeleitet werden:

Es besteht eine deutliche Zustimmung zum Bedarf einer methodisch-anleitenden Unterstützung (vgl. Abbildung 27). Zusätzlich wird die Bewertung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße von einem Großteil der Befragten als schwierig empfunden, was einer der Gründe sein kann, weshalb eine solche Bewertung zu Projektbeginn häufig ausbleibt. Wird sie dennoch durchgeführt, so ist ihr Ergebnis häufig von hoher Unsicherheit und beschränkter Aussagekraft geprägt (vgl. Abbildung 28). Eine frühzeitige Bewertung des Wertschöpfungspotenzials einer Berücksichtigung der Energieeffizienz zu Projektbeginn findet in der Regel nicht statt, sodass diese Bewertung bei der Priorisierung von Zielen auch nicht berücksichtigt werden kann. Eine technische Bewertung des Potenzials findet in den meisten Fällen statt, eine wirtschaftliche Betrachtung hingegen seltener (vgl. Abbildung 29). Eine differenzierte und projektspezifische Bewertung von Relevanz und Potenzial müsste unterschiedliche zugrunde liegende Motive differenziert betrachten und bewerten. Obwohl die vorgeschlagenen Basismotive die Zustimmung der Befragten erhalten, gibt es keine Hinweise darauf, dass die Motive gezielt bei der Bewertung verwendet würden. Besonders kritisch werden in der Praxis die Formulierung sowie das darauf basierende Verständnis der Zielgröße Energieeffizienz gesehen. Dies führt dazu, dass in der Entwicklungspraxis häufig mit Energieeffizienzzielen gearbeitet werden

²⁷⁵ Hall 1962

muss, für welche weder die Systemgrenzen geklärt sind, noch eine Messbarkeit und damit Überprüfbarkeit der Zielerreichung gegeben ist (Vgl. Abbildung 30).

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen somit auch, dass bei der Berücksichtigung der Energieeffizienz im Zielsystem neben dem generischen Ziel auch geeignete Kenngrößen expliziert werden sollten. Zusätzlich müssen die Ziele bzw. deren zum Zweck der Validierung vorgesehene Definitionsmerkmale mit dem jeweiligen Produktprofil verknüpft werden, um so sinnvolle und früh definierte sowie eng am Produktprofil orientierte Testcases festlegen zu können²⁷⁶.

²⁷⁶ Vgl. hierzu auch Zingel 2013, S. 138ff

6 Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße

Der effiziente Einsatz von Energie wird im gesamten gesellschaftlichen Kontext sowohl sensibler wahrgenommen, als auch tatsächlich zunehmend höher bewertet. Das Zusammenwirken dieser beider Tatsachen hat für die Produktentwicklung zweierlei zur Folge: Zum einen bemühen sich die Hersteller von energieverbrauchenden²⁷⁷ Produkten und sogar Hersteller von Produkten, bei welchen kein unmittelbarer Energieverbrauch ersichtlich ist, die Energieeffizienz ihrer Produkte bei vermeintlich unverminderter Effektivität deutlich herauszustellen. Zum anderen wachsen die tatsächlichen Anforderungen unterschiedlichen Ursprungs bezüglich der Zielgröße Energieeffizienz an die Produktentwicklung. Formulierung und Kommunikation der entsprechenden Ziele und Anforderungen liegen jedoch in der Regel in einer sehr undifferenzierten Form vor.²⁷⁸ Wie bei jeder Zielgröße in der Produktentwicklung ist eine möglichst präzise Definition, Quantifizierung und Kommunikation des Ziels Voraussetzung für die erfolgreiche Zielerfüllung. Gerade diese drei Aspekte fallen für Energieeffizienzziele jedoch häufig besonders schwer, da eindeutige Definitionen und damit ein einheitliches Verständnis nicht ohne Weiteres verfügbar sind, eine angemessene Quantifizierung unter anderem durch die fehlenden einheitlichen Definitionsmerkmale nahezu unmöglich ist sowie die eindeutige Kommunikation infolgedessen umso schwerer fällt. Die Entwicklung eines einheitlichen und differenzierten Zielverständnisses ist jedoch Grundlage für eine angemessene Quantifizierung zum Ermöglichen einer Zielerreichungsüberprüfung sowie für eine entsprechende Kommunikation des eigentlichen Ziels.

Dieses Kapitel widmet sich der systematischen Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße, entsprechend der zweiten Forschungsfrage, sowie der dazugehörigen Unterfragen²⁷⁹:

Wie kann Energieeffizienz als Zielgröße systematisch berücksichtigt werden?

- Welche Aspekte der Energieeffizienz müssen bei der Entwicklung der Zielgröße berücksichtigt werden?
- Wie kann die Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße bewertet werden?

²⁷⁷ „energieverbrauchsrelevanten“ nach 2010/30/EU (2010)

²⁷⁸ Vgl. Kapitel 5 „Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße“

²⁷⁹ Vgl. Kapitel 4

- Wie können die Motive für die Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße identifiziert werden?
- Wie kann eine geeignete Systemgrenze für die Betrachtung der Energieeffizienz als Zielgröße frühzeitig definiert werden.

Ein systematisch-methodisches Vorgehen verknüpft eine Synthese-orientierte und zielstrebige Handlungsweise mit notwendigen planvollen analytischen Schritten für eine ausreichend umfassende Betrachtung des Problem- und Lösungsraums. Die Unterstützung von analytischen Elementen bei der Zielentwicklung ist insbesondere für die Energieeffizienz theoretisch sinnvoll, wie der in Kapitel 2 vorgestellte Stand der Forschung belegt, und praktisch notwendig, wie die im vorherigen Kapitel behandelte empirische Untersuchung zeigt. Die Unterstützung der Zielentwicklung soll hier durch eine Systematisierung erfolgen. Unter dem Begriff der Systematisierung wird das Anlegen einer Ordnung verstanden.²⁸⁰ Sie dient dem Anlegen eines Systems, also der inhaltlichen planmäßigen Strukturierung und Abgrenzung der einzelnen Inhalte und deren wechselseitiger Beziehungen.

Im Rahmen der Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße soll untersucht werden, welche allgemeinen Zusammenhänge und Vorgehensschritte hierbei berücksichtigt werden müssen und wie diese modelliert und damit für den Entwickler unterstützend abgebildet werden können. Dafür muss zunächst geklärt werden, welche Kriterien den Entwickler und das jeweilige Entwicklungsprojekt hinsichtlich der Berücksichtigung des Ziels Energieeffizienz beeinflussen. Mittels einer Bewertung dieser Kriterien bzgl. ihrer projektspezifischen Ausprägung und Relevanz (vgl. Abbildung 32, „Input“) soll der Entwickler weiterführende Informationen und Empfehlungen zur weiteren Handhabung der Zielgröße bekommen (vgl. Abbildung 32, „Output“). Diese Informationen umfassen eine Beurteilung der anzunehmenden projektspezifischen Zielgesamtrelevanz und deren Verteilung auf die zugrunde liegenden Motive sowie die Identifikation zu fokussierender Aktivitäten, PLC-Phasen, oder Betrachtungsräume. Dieser Zusammenhang ist schematisch in Abbildung 32 dargestellt. Darauf aufbauend kann eine geeignete Überführung in ein quantitatives Energieeffizienzziel erfolgen, welche im Zuge der anschließenden Operationalisierung (Kapitel 7) behandelt wird.

²⁸⁰ Vgl. Bibliographisches Institut 2014

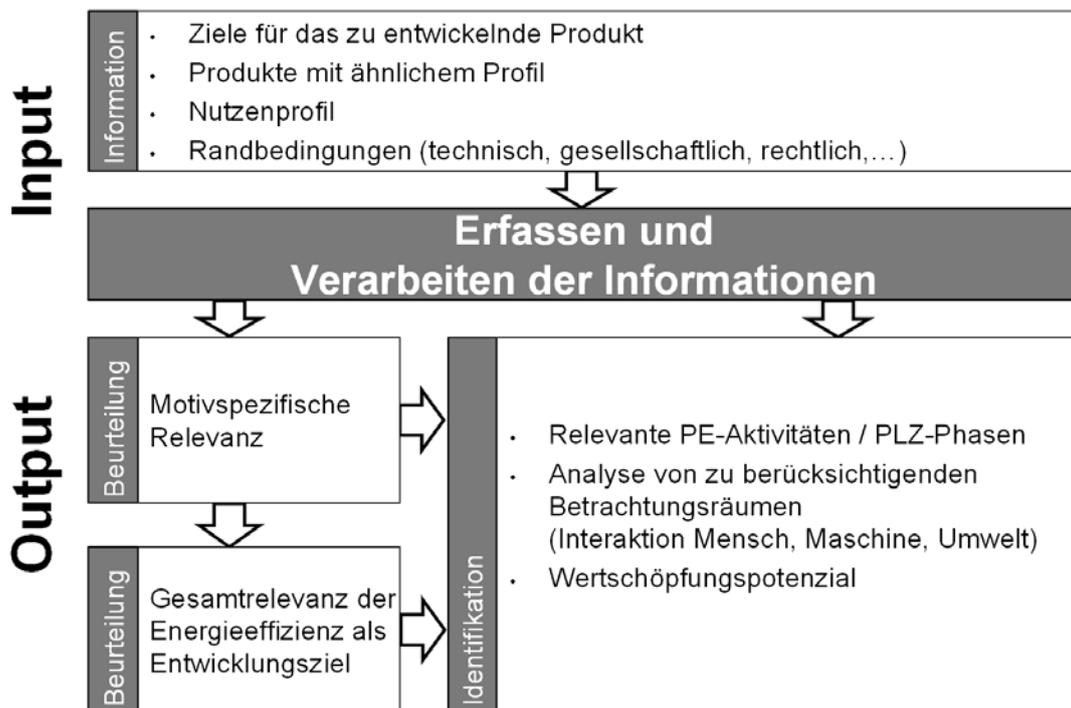


Abbildung 32: Prinzipieller Ablauf des methodischen Ansatzes zur differenzierten Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße.²⁸¹

Generell werden Effizienzziele durch einen Kompromiss von Funktionalitäts- und Produktleistungszielen gegenüber entsprechenden Aufwandszielen charakterisiert. Ein solcher Kompromiss und die damit verbundenen Entscheidungen sind geradezu exemplarisch für viele wesentliche Entscheidungen im Produktentstehungsprozess. Das Besondere an der Energieeffizienz ist ihr äußerst generischer Charakter, die damit verbundene heterogene Bedeutungs- und Verständnisvielfalt, der hohe Vernetzungsgrad sowie der damit verbundene hohe Impact²⁸² auf die übrigen Ziele in unterschiedlichen Bereichen des Zielsystems sowie die gegenwärtige und zukünftig wachsende Prominenz des Themas im gesellschaftlichen und ökonomischen Kontext.

Eine differenzierte Betrachtung und Berücksichtigung der eigentlichen Relevanz von Energieeffizienzsteigerungen aus Sicht unterschiedlicher motivbezogener Perspektiven wurde bisher sowohl in wissenschaftlichen Untersuchungen zur Entwicklungsmethodik (vgl. Abschnitt 2.4), als auch in der Entwicklungspraxis, vernachlässigt (vgl. Abschnitt 5.4). Die Relevanz beschreibt dabei die Einschätzung

²⁸¹ Nach Albers; Martin et al. 2014, S.6

²⁸² Nach Albers; Lohmeyer et al. 2011, S.4 beschreibt der Impact das Ausmaß voraussichtlicher Auswirkungen einer Entscheidung im Sinne dadurch notwendiger Änderungen des Zielsystems und/oder des Objekts.

der Wichtigkeit oder Bedeutsamkeit, die einer Sache in einem bestimmten sachlichen oder fachlichen Zusammenhang zugeordnet wird.²⁸³ Dabei hängt die Einschätzung der Wichtigkeit direkt mit dem aus der jeweiligen Sicht erwarteten Mehrwert im Falle einer Berücksichtigung zusammen.²⁸⁴ Diese Einschätzung der Wichtigkeit variiert naturgemäß in Abhängigkeit davon, welche Sichten oder Motive berücksichtigt werden und wie deren Ausprägung und relative Gewichtung ausfällt. Aussagen über die Relevanz eines Ziels ermöglichen eine sinnvolle systematische Priorisierung und erlauben zusätzlich eine teilweise Abschätzung des damit verbundenen Wertschöpfungspotenzials, welches sich in erster Näherung durch die Dimensionen *Relevanz* und *technisches Potenzial* darstellen lässt.²⁸⁵ Dieser qualitative Zusammenhang wird in Abschnitt 6.2.4 genauer betrachtet.

6.1 Zu berücksichtigende Aspekte für die Entwicklung von Energieeffizienzzielen

Eine praktische und differenzierte Verwendung eines Ziels setzt einen gewissen Reifegrad des Ziels voraus.²⁸⁶ Um einen solchen Reifegrad möglichst früh im Produktentstehungsprozess erreichen zu können, bedarf es des Schließens von Definitionslücken²⁸⁷. Dies erfolgt durch sukzessive Untersuchung und Klärung einzelner Zieleigenschaften, sodass gemeinsame Ziele kommuniziert, verfolgt und überprüft werden können.²⁸⁸ Die Erhöhung des Reifegrades eines Ziels ermöglicht somit erst ein angemessen differenziertes Zielverständnis. Wie der Stand der Forschung im Bereich der Zielsystementwicklung (Abschnitt 2.2.2) sowie bezüglich des Design to Energy Efficiency (Abschnitt 2.4) zeigt, basiert eine systematische Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße auf einer frühen ebensolchen Steigerung des Zielreifegrades. Dies beinhaltet zwei wesentliche aufeinander aufbauende Elemente: Eine frühe differenzierende Klärung der Zielabsicht, also die Überführung des abstrakten Begriffs in den projektspezifischen Kontext sowie die Konkretisierung des Ziels durch das Schließen von Definitionslücken. Eine scharfe Abgrenzung dieser beiden Elemente ist in der Regel nicht möglich, jedoch auch nicht zwingend notwendig.

²⁸³ Vgl. Abschnitt 2.4.3

²⁸⁴ Dieser Zusammenhang wird in ähnlicher Form auch in anderen wissenschaftlichen Arbeiten vorausgesetzt. Vgl. hierzu Börzel 1997 und Neuß 2008

²⁸⁵ Vgl. Albers; Martin et al. 2014, S.6

²⁸⁶ Vgl. Albers; Lohmeyer et al. 2011

²⁸⁷ Auch englisch: „lack of definition“, Vgl. Albers; Ebel et al. 2011a und Abschnitt 2.2.2

²⁸⁸ Vgl. Albers; Ebel et al. 2011a und Abschnitt 2.2.2

Für die Klärung der Zielabsicht bedarf es primär einer differenzierenden Untersuchung der dem Ziel zugrunde liegende **Motivation** als Gesamtheit bestehender Motive in ihrer jeweiligen Ausprägung sowie der Ausprägungszusammensetzung. Die anschließende Konkretisierung basiert im Wesentlichen auf der Klärung der **projektspezifischen Relevanz** der Energieeffizienz als Entwicklungsziel, einer Identifikation der wesentlichen zu erwartenden Wechselwirkungen, einer Identifikation des dem Ziel zuzuschreibenden (Wertschöpfungs-) **Potenzials** sowie der zu berücksichtigenden **Systemgrenzen**.

Dabei trägt ein Informationsgewinn bezüglich der Gesamtheit dieser Aspekte wesentlich zu dem im Rahmen der Zielsetzung (Abschnitt 3.2) geforderten differenzierten Verständnis der Energieeffizienz als Zielgröße bei.

6.1.1 Identifikation geeigneter Relevanzkriterien

Die Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentwicklung aus der Perspektive der projektauslösenden Unternehmensebene sowie deren späteres Verständnis durch die projektbeteiligten Entwickler, kann in unterschiedliche Teildimensionen aufgelöst werden, die Relevanzkriterien entsprechen.

Relevanzkriterien beschreiben eine systematische Ordnung von Kriterien, nach welchen die Wichtigkeit einer Sache in einem definierten Kontext bewertet werden kann. Mit ihrer Hilfe soll eine vergleichsweise unscharfe und weniger differenzierte direkte Bewertung der Relevanz vermieden werden. Relevanzkriterien zur Bewertung der projektspezifischen Wichtigkeit der Energieeffizienz als Zielgröße lassen sich zu einem Großteil durch eine Relevanzbeurteilung der einzelnen (das Ziel verursachenden) Beweggründe oder Motive beschreiben.²⁸⁹ Relevanzkriterien sind demnach:

- Ausprägung der Motivation
 - Gewichtung der betroffenen Motive
 - Ausprägung der dem Ziel zugrunde liegenden Motive
 - Anzahl und Wechselwirkung der dem Ziel zugrunde liegenden Motive
- Ausprägungen und Wechselwirkungen einzelner charakteristischer Zielmerkmale und Anforderungen

Beispielsweise kann die spezifische Bedeutsamkeit der Energieeffizienz als Zielgröße im Kontext der Entwicklung von Elektromobilitätslösungen wie folgt bewertet werden:

²⁸⁹ Vgl. Albers; Martin et al. 2014

- Primär besteht dabei das Motiv, die Fahrzeugreichweite zu erhöhen, welches entsprechend hoch gewichtet wird, da es direkt mit zentralen Kundenanforderungen verknüpft ist. Je nach späterer Lösung zur Speicherung der elektrischen Energie könnte die Verminderung von in Umwandlungsprozessen anfallenden Emissionen ein weiteres (geringer gewichtetes) Motiv zur Steigerung der Energieeffizienz sein. Es macht für die zu bewertende Gesamtrelevanz also einen Unterschied, ob nur ein Motiv für ein besonders energieeffizientes Produkt zugrundeliegt oder mehrere. Enge Wechselwirkungen bestehen in dieser beispielhaften Betrachtung zunächst nicht, würden die Relevanz ansonsten jedoch insgesamt erhöhen.
Zusätzlich ist zu klären, wie wichtig es aus unterschiedlichen Sichten für den Produkterfolg und die verschiedenen Stakeholder ist, eine Produktlösung mit hoher Reichweite zu entwickeln. Dies beschreibt die Ausprägung.
- Weiterhin können einzelne Anforderungen wie Ladedauer oder die Wechselwirkung aus Ladedauer und Verfügbarkeit von Lade-Infrastruktur die Relevanz einer energieeffizienten Lösung direkt steigern.

Neben der Ausprägung der einzelnen, dem Ziel gegebenenfalls zugrunde liegenden, Motive, ist aus Gründen einer Berücksichtigung der Wechselwirkungen und somit etwaiger Emergenzeffekte, auch die Anzahl der überhaupt betroffenen Motive sowie deren spezifische Wechselwirkungen ein weiteres Relevanzkriterium. Eine Gewichtung der einzelnen Motive entscheidet ebenfalls über die ermittelte Relevanz. Die Gewichtung ist hierbei von entscheidender Bedeutung, weil dadurch neben den Kundenanforderungen berücksichtigenden Produktprofilaspekten die unternehmensstrategischen Überlegungen, die von der Relevanzbewertung wesentlich betroffen sind, in die Bewertung und somit in die Priorisierung der Zielgröße miteinbezogen werden. Sie hat direkten Einfluss auf die Relevanzberechnung, da die anteilige motivspezifische Relevanz der Energieeffizienz dem Produkt von Teilrelevanzwert und Gewichtungsfaktor entspricht. Somit stellt die Gewichtung ein weiteres Kriterium dar. Zusätzlich können einzelne Zielmerkmale und deren Kombinationen die Relevanz eines Ziels direkt beeinflussen.

6.1.2 Identifikation der zugrunde liegenden Motivation

Der Begriff der Motivation beschreibt die Gesamtheit der Beweggründe oder Motive, die eine Handlung beeinflussen und somit zu einer bestimmten Handlungsweise

anregen.²⁹⁰ So impliziert bereits diese grundlegende Betrachtung, dass eine individuell gewählte Handlungsweise auf den jeweilig bestehenden Motiven basiert. Sie lässt jedoch ebenso die umgekehrte Schlussfolgerung zu, dass eine konsistente und zielführende Handlungsanweisung die im jeweiligen Kontext bestehende übergeordnete Motivation aus Unternehmenssicht berücksichtigen sollte. Handlungsanweisungen, beispielsweise in Form von Gestaltungsrichtlinien, die diesen Umstand nicht berücksichtigen, können die vielfältigen und von unterschiedlichen Seiten für einzelne Ziele einer Produktentwicklung verantwortlichen Motive nicht differenziert miteinbeziehen und sind somit anfällig für Widersprüche unter den Zielen.

Um eine Motivation zu erfassen, die einer Zielstellung zugrunde liegt, müssen daher die unterschiedlichen möglichen Motive betrachtet und hinsichtlich ihrer jeweiligen Ausprägung bewertet werden. Das Gesamtbild, welches sich aus der Summe der Motivausprägungen ergibt, ist die Motivation. Ähnlich der Unterteilung von endogenen und exogenen Randbedingungen²⁹¹, die unterschiedliche Anforderungsursprünge beschreibt, können auch die der Zielstellung zugrunde liegenden Motive in endogene und exogene Motive unterteilt werden. Dabei beschreiben die endogenen Motive diejenigen Absichten und Intentionen, die primär aus dem Unternehmen stammen. Exogene Motive hingegen beschreiben diejenigen, deren Ursprung und/oder Einflussbereich primär außerhalb des Unternehmens liegen. Aus dem Stand der Forschung und bestehenden Erfahrungen aus unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten²⁹² sowie durch theoretische Überlegungen, werden fünf Basismotive identifiziert (vgl. Tabelle 5), welche durch die Gesamtheit ihrer Ausprägungen jegliche Motivationslage abbilden können sollen.

²⁹⁰ Vgl. Bibliographisches Institut 2014

²⁹¹ MUSCHIK spricht in diesem Kontext von „constraints (...) as a collective term for all demands, including values, relevant to the generation of future product properties, arising from within (endogenous) or without (exogenous) a company“. Muschik 2011, S.17

²⁹² Vgl. Albers; Martin 2012; Albers; Martin 2013, Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit), HaCam 2014 (betreute Abschlussarbeit); Lorenz 2014 (betreute Abschlussarbeit)

Tabelle 5: Basismotive für die Modellierung einer möglichen Motivation zur Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße.

Motivursprung / -auswirkung	Motive	Beispielhafte Einflussfaktoren
Endogen	Ökonomie	Relative energetische Betriebskosten Herstellkosten (optional) Förderungen und Vergünstigungen
	Technik und Funktion	Mobilität Leistungsgrenze Energiefluss Material Leistungsgrenze Energiefluss Anwender (Ergonomie) Leistungsgrenze Energiequelle Räumliche Systemarchitektur (Layout) Downsizing
	Ökologie	Energieaufwand Energieart Emissionen
Exogen	Rechtliches	Richtlinien/Verordnungen Grenzwerte Verbindliche Labels
	Außendarstellung	Labels Marketing / Image

Diese fünf Basismotive werden im Rahmen der durchgeführten empirischen Untersuchung unter Entwicklungsingenieuren hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und ihrer jeweiligen Richtigkeit²⁹³ bestätigt (vgl. Abschnitt 5.4). Die hierarchische Struktur erhebt dabei keinen Anspruch auf ausschließliche Richtigkeit. Eine Zuordnung der Basismotive zu dem endogenen oder exogenen Ursprung sowie eine nähere Beschreibung durch die wesentlichen Einflussfaktoren sind in Tabelle 5 dargestellt. Da in der vorliegenden Arbeit der Fokus der Energieeffizienzbetrachtung auf dem Produkt und dem durch seine Anwendung möglichen Nutzen liegt, wird eine gezielte Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Produktlebenszyklusabschnitte (wie Herstellung und Entsorgung) vernachlässigt. Eine solche Berücksichtigung ist durch den prinzipiellen Ansatz der Methode jedoch ebenfalls abgedeckt. Im Folgenden werden die fünf Basismotive einzeln vorgestellt und näher erläutert:

²⁹³ im Sinne einer zustimmenden Nachvollziehbarkeit

Ökonomie

Das ökonomische Motiv umfasst alle direkt finanziell verknüpften Einflussfaktoren und ist daher aus unternehmerischer Sicht das zentrale Handlungsmotiv. Dabei beschreiben die in Tabelle 5 aufgeführten relativen Betriebskosten das Verhältnis von energetisch bedingten Betriebskosten zu dem Anschaffungspreis für den Kunden, da absolute Kosten zunächst keine Schlussfolgerung zur Relevanz erlauben. Einsparungen von energetisch bedingten Betriebskosten sind häufig in Form von möglichen Verkaufspreiserhöhungen ein wesentlicher Einfluss auf das ökonomische Motiv des Herstellers. Förderungen stehen stellvertretend für alle Arten öffentlicher Förderung, Vergünstigungen von Krediten und vergleichbaren Einflussfaktoren.

Ein im Betrieb energieeffizientes Produkt verursacht in Entwicklung und Herstellung tendenziell höhere Kosten, kann jedoch bei entsprechendem Kundeninteresse auch zu einem überproportional höheren Preis auf dem Markt angeboten werden als ein vergleichbares Produkt mit geringerer Energieeffizienz. Die Bereitschaft des Kunden, für energieeffiziente Lösungen einen höheren Preis zu bezahlen, hängt – sofern die Energiekosten eine relevante Größenordnung darstellen – von der zu erwartenden Amortisationsdauer ab. Dies gilt aktuell als einer der Gründe für den nur sehr langsam wachsenden Markt der individuellen Elektromobilität. So rechnen sich Elektrofahrzeuge finanziell bisher erst nach etwa 180.000 Kilometern.²⁹⁴

In Fällen besonders ausgeprägter Energieeffizienzsteigerung kann sogar gänzlich auf einzelne zuvor benötigte Teilsysteme verzichtet werden. So ist es durch moderne Isolation und Verwendung von Wärmetauschern beispielsweise möglich, ein Gebäude ohne Heizung zu bauen, ohne auf eine angemessene Raumtemperaturregelung zu verzichten. Dabei kann nicht nur auf die Heizung selbst, sondern auch auf die dazugehörige Peripherie verzichtet werden. So kann die Passivbauweise als energieeffiziente Produktalternative bereits beim Bau günstiger sein und ermöglicht eine Reduktion der Energiekosten um 99%.²⁹⁵ Energetische Betriebskosten beeinflussen jedoch inzwischen auch Entscheidungen in zuvor emotional dominierten gesellschaftlichen Bereichen wie der persönlichen Mobilität. So sind die Kunden zunehmend bereit, aus rationalen (beispielsweise ökonomischen oder ökologischen) Gründen auf ein eigenes Kraftfahrzeug zu verzichten.²⁹⁶

²⁹⁴ Vgl. Schaal 2011 nach Dudenhöffer 2011

²⁹⁵ Vgl. Lovins 2005, S.16 nach Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

²⁹⁶ Vgl. Knie 2011

Die auch zukünftig zu erwartenden weiter steigenden Energiekosten für Endverbraucher machen Betriebskosten zu einem wesentlichen – gegebenenfalls auch unbewussten – Motiv für energieeffiziente Lösungen. Geringere Energieverbrauchs-kosten machen das Produkt am Markt attraktiver, was wiederum das Motiv des Herstellers begründet. Besonders ökologiebewusste Käufer akzeptieren unter Umständen sogar, dass sich die Anschaffung finanziell überhaupt nicht oder erst nach vielen Jahren lohnt.

Bei mobilen Geräten mit wieder aufladbarer elektrischer Energiequelle muss der Wechsel des Energiespeichers nach einer bestimmten Anzahl Ladezyklen gegebenenfalls bei der Kostenbetrachtung mit berücksichtigt werden. Gerade bei Produkten, die in der Regel täglich oder mehrmals täglich geladen werden, können die Betriebskosten dadurch deutlich steigen. Dies wird auf absehbare Zeit auch elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge betreffen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die ökonomischen Motive zur Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße sind Förderungen. Diese können in Form von zinsgünstigen Darlehen, Steuervergünstigungen oder Zuschüssen bestehen. Dabei können sowohl Unternehmen als auch Endverbraucher gezielt unterstützt werden. Für Unternehmen gibt es beispielsweise das ERP-Innovationsprogramm der KfW-Bank, die Kredite zu besonders guten Konditionen anbietet, wenn der Kredit für eine Neu- und Weiterentwicklung von „Technologien zur Einsparung von Energie, zur effizienteren Energieerzeugung, zur Energiespeicherung und zur effizienteren Energieübertragung“²⁹⁷ verwendet wird. Die meisten Förderungen jedoch fokussieren eine Unterstützung des produzierenden Gewerbes.²⁹⁸ Auch der Kauf besonders energieeffizienter Geräte durch den Endverbraucher kann vereinzelt gefördert werden. Dabei betreffen die meisten Förderungen bauliche Maßnahmen, die Energieeinsparungen bewirken sollen. Allerdings bieten diese Förderungen in der Regel bisher kein ausreichendes Motiv für die Verwendung der Energieeffizienz als Entwicklungsziel, sollten jedoch zur Kenntnis genommen werden.

Technik und Funktion

Das technisch-funktionale Basismotiv umfasst alle Einflussfaktoren, die den wesentlichen beabsichtigten oder antizipierten Funktionsumfang des Produktes sowie mögliche technische Einschränkungen und Chancen abbilden. Funktionale Motive können durch das ihnen zugrunde liegende funktionsbestimmende oder

²⁹⁷ Vgl. KfW Bank 2014

²⁹⁸ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013

funktionsbeschränkende Wesen die Berücksichtigung der Energieeffizienz als Ziel in manchen Fällen unausweichlich werden lassen. In der Regel werden die funktionalen Motive durch unterschiedliche beschränkende Grenzen des Leistungsflusses beeinflusst, die in die drei Bereiche begrenzter „Leistungsfluss Material“, „Leistungsfluss Energiequelle“ sowie „Leistungsfluss Anwender“ unterteilt werden können.

Zu den wesentlichen Einflussfaktoren eines funktionalen Motivs für die Entwicklung energieeffizienter Produkte gehören die thermischen Energieverluste, die sich in Form ungewollter aus dem System austretender Wärmeströme äußern und den Leistungsfluss im Material begrenzen. Der deutlich höchste Anteil des im energetischen Wirkungsgrad (vgl. Abschnitt 2.5.3) beschriebenen „unerwünschten“ Energieoutputs erfolgt in Form thermischer Energieverluste. Hierauf kann beispielsweise auch mit thermisch höher belastbaren Werkstoffen reagiert werden, diese kompensieren jedoch nur die negativen Auswirkungen, nicht jedoch deren Ursprung und sind daher häufig mit Mehrkosten und/oder technischen Nachteilen behaftet. Die notwendige Abführung von entstehender Abwärme aus thermischen Verlusten kann zusätzlich einen wesentlichen Einfluss auf den benötigten Bauraum ausüben, beispielsweise in Form von Lüftergrößen, Ablufträumen oder benötigten Abständen zwischen abwärmeverursachenden oder –behafteten Bauteilen. Ebenfalls damit verbunden ist die Wahl einer die auftretenden Wärmeströme berücksichtigenden räumlichen Systemarchitektur, wie beispielsweise bei der Entwicklung von Produktionsanlagen.

Selbst wenn der absolute Energieverbrauch eines Produktes für sich genommen keiner funktionalen Grenze unterliegt, können funktionale Motive für eine Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße gegeben sein: Sobald die Leistungsgrenzen einer beizubehaltenden Energiequelle (z.B. Stromnetz) ausgeschöpft sind, die Leistung des Produktes aber gesteigert werden soll, muss das Produkt zwangsläufig energieeffizienter gestaltet werden. Dies gilt auch für Produkte, die ohne größere Anpassungen auf unterschiedlichen Märkten (z. B. Asien und Afrika) bei stark schwankenden Leistungseingängen definierte Mindestziele für die Produktleistung zu erfüllen haben.²⁹⁹

Da das Verhältnis von Produktnutzen zu dem für dessen Erzeugung benötigten energetischen Aufwand in vielen Fällen auch durch den Kraft- oder Energieaufwand, der durch den Anwender eingebracht wird, maßgeblich beeinflusst wird, können auch ergonomische Motive bestehen, die die Energieeffizienz betreffen. Bei solchen

²⁹⁹ Vgl. Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

ergonomischen Motiven steht der „begrenzte Leistungsfluss des Anwenders“, also der vom Anwender zur Funktionserfüllung aufzubringende (naturgemäß beschränkte) Energieaufwand im Vordergrund. Die Leistungsfähigkeit einer Bohrmaschine kann beispielsweise abhängig von der (durch den Anwender aufzubringenden) Anpresskraft sein. Soll nun die gleiche Bohrleistung bei verringerter Anpresskraft erreicht werden, so stellt dies eine Steigerung der Energieeffizienz aus ergonomischer Sicht dar. Eine Vernachlässigung dieses Aspekts kann zu einer intrinsischen Energieeffizienzsteigerung des Produkts führen, welche durch einen unangemessen hohen energetischen Mehraufwand des Anwenders kompensiert werden muss. Aus Höhe, Art und Dauer einer Belastung sowie individuellen Faktoren wie spezifischen Fertigkeiten, grundsätzlicher und aktueller physischer Verfassung ergibt sich die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung.³⁰⁰ Um die Höhe einer ergonomischen Belastung beurteilen zu können, bieten sich unterschiedliche bestehende methodische Ansätze, wie beispielsweise die „Leitmerkmalermittlung zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen“³⁰¹, an. Hier wird anhand der Tätigkeitsdauer, Art und Höhe der Kräfte, Körperhaltung und anderen Kriterien ein Punktwert errechnet. Mit diesem Punktwert kann eine grobe Bewertung der Belastung bzw. eine Zuordnung zu einem Risikobereich vorgenommen werden.

Ökologie

Bei der Betrachtung ökologischer Motive kann prinzipiell unterschieden werden zwischen tatsächlich ökologisch orientierten Beweggründen und solchen, die eigentlich ökonomisch orientiert sind, jedoch aus Gründen der Außendarstellung „ökologisiert“ werden. Im Rahmen der Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße wird dieser Unterschied gezielt berücksichtigt.

Das ökologische Motiv wird im Wesentlichen durch die Energieart, die damit verbundenen Emissionen sowie durch die absolute Höhe des Energieaufwands definiert. Es ist in der Regel eng mit der gesellschaftlichen Wahrnehmung verknüpft, welche wiederum durch Normen, Gesetze und aktuellen Trends wechselseitig geprägt wird. Die ökologischen Eigenschaften eines Produkts werden zunehmend auch zu Werbezwecken eingesetzt. Das steigende Nachhaltigkeitsbewusstsein der Verbraucher macht dabei die Energieeffizienz als erstrebenswerte Produkteigenschaft auch für Unternehmen attraktiv. Wenn die Ökologie das dominante Motiv zur Gestaltung energieeffizienter Produkte ist, kann es angemessen sein, einen

³⁰⁰ Vgl. Zülch 2011

³⁰¹ Vgl. BAuA 2012

reduzierten Produktnutzen zugunsten eines überproportional stark gesenkten Aufwandes zu akzeptieren oder sogar bewusst anzustreben.

Rechtliche Motive

Die rechtlichen Motive beziehen sich auf bereits existierende und zukünftig zu erwartende Gesetze und Verordnungen, die bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte zu berücksichtigen sind. Sie fordern die Einhaltung festgelegter Standards. Die Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung³⁰² und die Verordnung zur umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte³⁰³ sind die wohl bekanntesten Vertreter dieser zu berücksichtigender Elemente.

Die Verordnungen zur umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte legen Obergrenzen für den Energieverbrauch von Produkten fest. Dazu gehören beispielsweise Wasserpumpen, Ventilatoren und Heizgeräte oder es werden allgemeine Anforderungen an den Stromverbrauch von Elektrogeräten in verschiedenen Betriebszuständen definiert. Die Einhaltung dieser Mindestanforderungen ist Voraussetzung für eine legale Marktteilnahme in der Europäischen Union. Auf diesem Weg sollen energieineffiziente Produkte schrittweise vom Markt genommen werden.

In einzelnen Produktkategorien oder Branchen können zusätzliche spezifische Vorschriften und gesetzliche Regeln existieren, die bei der Entwicklung aus Sicht der Energieeffizienz des Produkts zu berücksichtigen sind. Sowohl die Anzahl, als auch die Strenge der existierenden Verordnungen hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen.

Außendarstellung

Da Energieeffizienz nicht nur ein abstrakter Begriff, sondern auch eine nicht direkt sichtbare Produkteigenschaft ist, müssen die Hersteller den Kunden bezüglich dieser Eigenschaft informieren, um von dem sich daraus ergebenden Differenzierungsmerkmal profitieren zu können. Hierfür eignen sich insbesondere offizielle oder unabhängige Kennzeichnungen oder Gütesiegel. Häufig wird jedoch nicht nur mit der unmittelbaren Energieeffizienz, sondern auch mit ihren positiven Auswirkungen geworben, um so einen größeren Kundenkreis ansprechen zu können.³⁰⁴ Die wirksame Außendarstellung von energieeffizienten Produkten hat in der Regel hohe

³⁰² Vgl. Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG (2012)

³⁰³ Vgl. 2009/125/EU (2009)

³⁰⁴ Vgl. Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

unternehmensstrategische Priorität, da sie zu einem „grünen“ (also ökologisch sauberen) Image beiträgt, welches heute in nahezu allen Branchen angestrebt wird.

6.2 Systematische Bewertung der Relevanz

Eine Beurteilung der Gesamtrelevanz ergibt sich durch Zusammenfassung der einzelnen Relevanzbeurteilungen aus Sicht der unterschiedlichen Motive. Die jeweilige Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße aus Sicht einzelner Basis- oder Teilmotive hängt wiederum von mehreren Faktoren ab. Diese Faktoren ergeben sich wie oben beschrieben zum einen aus den angestrebten Zielen und den daraus abgeleiteten Anforderungen, zum anderen hängen sie von den späteren zu erwartenden Produkteigenschaften ab, welche durch Analyse von Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukten häufig bereits früh im Entwicklungsprozess hinreichend genau abgeschätzt und somit antizipiert werden können.

Die Abhängigkeiten der einzelnen Basis- oder Teilmotive von den Faktoren, wie beispielsweise den zu erwartenden oder zulässigen absoluten Energieverlusten über der Produktnutzungsdauer sind sehr unterschiedlich ausgeprägt. Ein solcher beispielhafter Zusammenhang ist zur Verdeutlichung der Unterschiedlichkeit der einzelnen Abhängigkeiten schematisch in Abbildung 33 dargestellt.

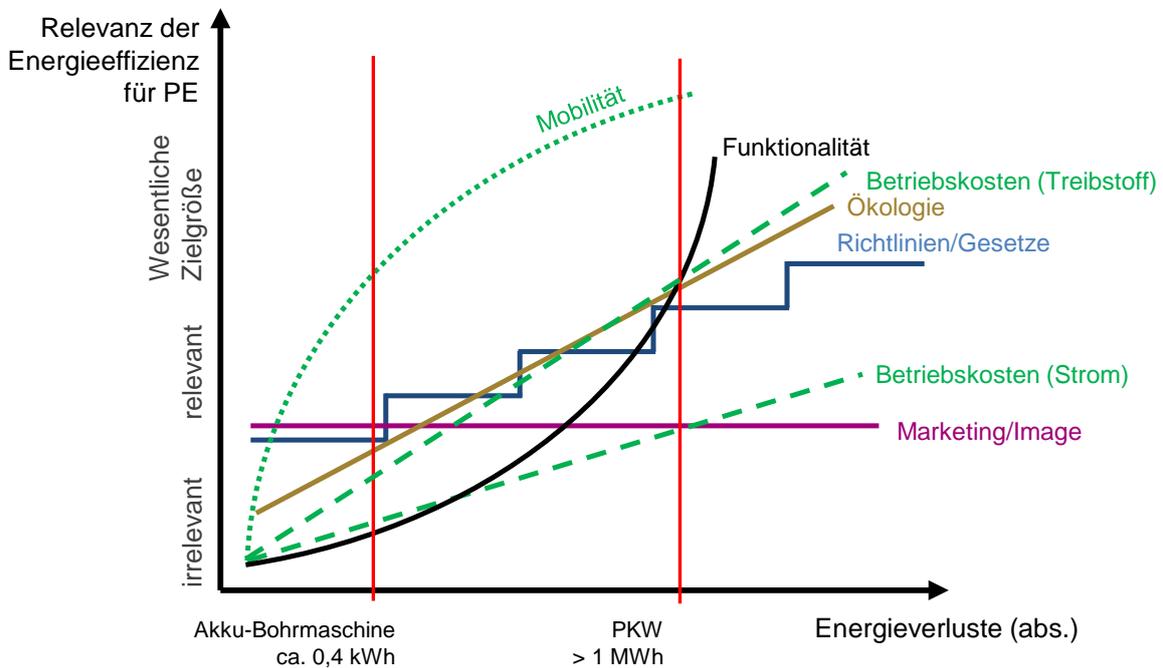


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße über einer exemplarischen Produkteigenschaft aus Sicht unterschiedlicher Motive.³⁰⁵

³⁰⁵ Nach Martin; Albers et al. 2013, S.3

Anhand der qualitativen Darstellung in Abbildung 33 können die wichtigsten Zusammenhänge erläutert werden:

Die Relevanz einer Zielgröße hat zunächst aufgrund ihres abstrakten Charakters naturgemäß keine klar definierbaren Grenzwerte, sondern kann nur grob in Bereiche wie beispielsweise „irrelevant“, „zu berücksichtigen“ und „sehr relevant“ eingeteilt werden. Die Abhängigkeiten der Relevanz aus der Sicht unterschiedlicher Motive sind sowohl in ihrer Höhe, als auch in ihrem Verlauf sehr verschieden ausgeprägt. Der Verlauf der tatsächlichen Abhängigkeit ist in realen Entwicklungsprozessen mitunter schwer zu ermitteln, einige auftretenden Formen können jedoch prinzipiell unterschieden werden:

Es gibt Motive wie beispielsweise die Außendarstellung (vgl. Abbildung 33), aus deren Sicht die motivspezifische Relevanz weitestgehend unabhängig von der betrachteten Produkthanforderung oder -eigenschaft ist. Weiterhin gibt es diskrete Abhängigkeiten, wie im dargestellten Beispiel aus Sicht des gesetzlichen Motivs, welches abhängig von der jeweiligen Produkteigenschaftsausprägung stufenförmig die entsprechende Teilrelevanz abbildet, was durch die Einteilung von Produktgruppen (beispielsweise in Leistungsklassen) und entsprechenden Grenzwerten in der betreffenden Verordnung begründet ist. Die Einteilung ist in diesem Fall anhand der abgebildeten Produkteigenschaft oder einer damit direkt korrelierenden Eigenschaft erfolgt.

Die tendenziell linearen Abhängigkeiten (vgl. Abbildung 33) können sich wiederum sowohl in ihrer Steigung unterscheiden, die die Zu- oder Abnahme der Motivspezifischen Relevanz über der betrachteten Produkthanforderung beschreibt (Abbildung 34, links), als auch in den zugehörigen Ordinatenabschnitten (Abbildung 34, Mitte). Die Gewichtung der einzelnen Motive aus unternehmens- und projektstrategischer Sicht führt bei der Bestimmung der Gesamtrelevanz zu einer Festlegung deren Ordinatenabschnitts als auch zu einer Beeinflussung des sich ergebenden Abhängigkeitsverlaufs. Basierend auf einer Beurteilung der Teilrelevanzen kann die Gesamtrelevanz als gewichtete Summe dieser Teilrelevanzen dargestellt werden (Abbildung 34, rechts).

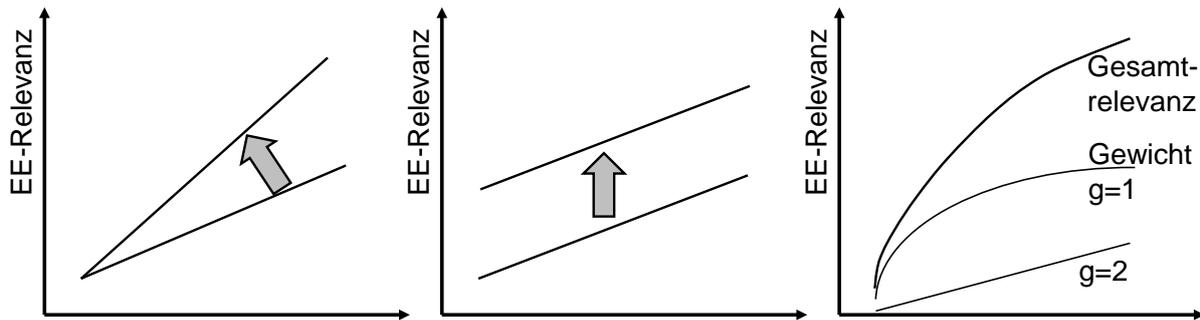


Abbildung 34: Unterschiede im Zusammenhang von Energieeffizienzrelevanz und Produktanforderung durch unterschiedliche Steigung (links) oder Relevanzbereich (mitte) sowie Darstellung des Einflusses der Gewichtung auf die Gesamtrelevanz.

6.2.1 Gewichtung der Motive

Eine Gewichtung der einzelnen Motive bietet die Möglichkeit übergeordnete unternehmensstrategische (ggf. branchenspezifische) Ziele bei der Beurteilung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße zu berücksichtigen und somit priorisierend miteinzubinden. Beispielsweise ist die relative Wichtigkeit der Außendarstellung als Motiv für die Entwicklung energieeffizienter Produkte im „Business to Customer“-Bereich in der Regel höher, als im „Business to Business“-Bereich, die relative Gewichtung der ökonomischen Motive im Sinne der Betriebskostensicht jedoch geringer anzunehmen. Die Gewichtung sollte in intersubjektivem Zusammenwirken mehrerer Teilnehmer aus strategisch ausreichend kompetenter Führungsebene erfolgen und nicht durch einzelne Entwickler.

Welches Verfahren zur Gewichtung verwendet wird, ist an dieser Stelle nicht entscheidend. Eine einfache direkte Vergabe von Gewichten beispielsweise von eins bis zehn hat sich jedoch im Rahmen der Validierung des Ansatzes im Industrieumfeld als zunächst ausreichend dargestellt (vgl. Abschnitt 9.1).

6.2.2 Bewertung der Ausprägung einzelner Motive

Eine direkte Bewertung der Motivausprägung durch den Entwickler erfordert eine eindeutige und vollständig explizite Definition der einzelnen Motivbegriffe, deren möglicher Wechselwirkungen sowie ein umfassendes Verständnis der häufig komplexen Zusammenhänge. Da dies in der praktischen Anwendung kaum zu gewährleisten ist, und so ein unzulässiges Maß an Unschärfe und Unsicherheit in die Bewertung einfließen würde, soll eine direkte Bewertung umgangen werden.

Daher werden die Ausprägungen der einzelnen Motive indirekt über die Abfrage von Zielen, Anforderungen, Randbedingungen und antizipierten Produkteigenschaften erfasst. Zunächst wurden Ansätze untersucht, die notwendigen Informationen mithilfe von binären Entscheidungsbäumen abzufragen (siehe Abbildung 35). Dies scheiterte

jedoch an der tatsächlichen Komplexität der inhaltlichen Zusammenhänge sowie der teilweise benötigten feineren Abstufung der abgefragten Informationen.³⁰⁶

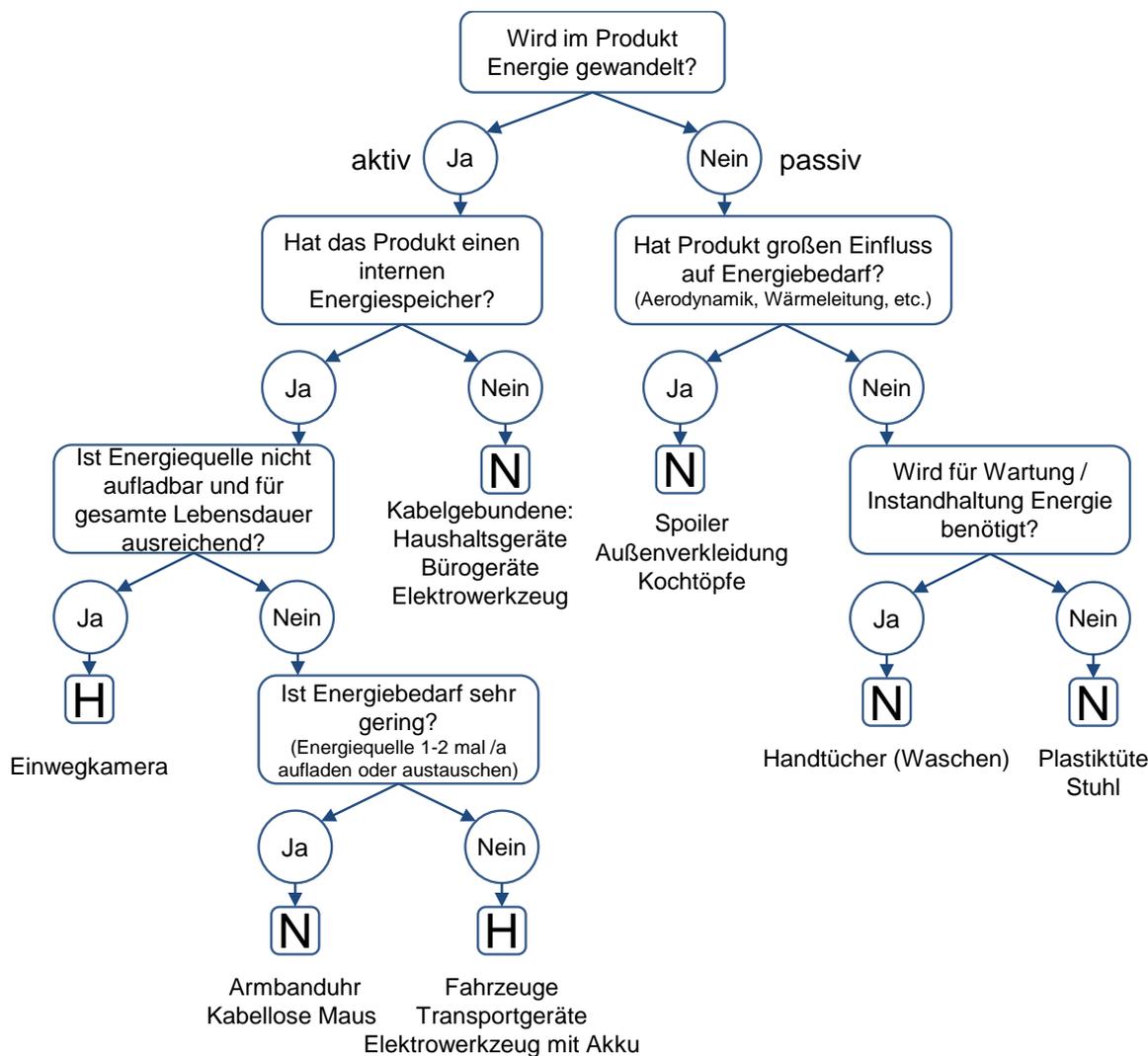


Abbildung 35: Binärer Entscheidungsbaum zur einfachen Bewertung der Energieeffizienzrelevanz (H=hoch; N=niedrig) aus Sicht einzelner Motive mit jeweiligen Produktbeispielen.³⁰⁷

Daher wird stattdessen eine Abfrage mittels eines interaktiven Fragebogens entwickelt. Durch die Beantwortung von mehreren Reihen von Fragen werden die wesentlichen Aspekte der jeweiligen motivspezifischen Relevanz beurteilt. Dieser prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 36 in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

³⁰⁶ Vgl. Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

³⁰⁷ Nach Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

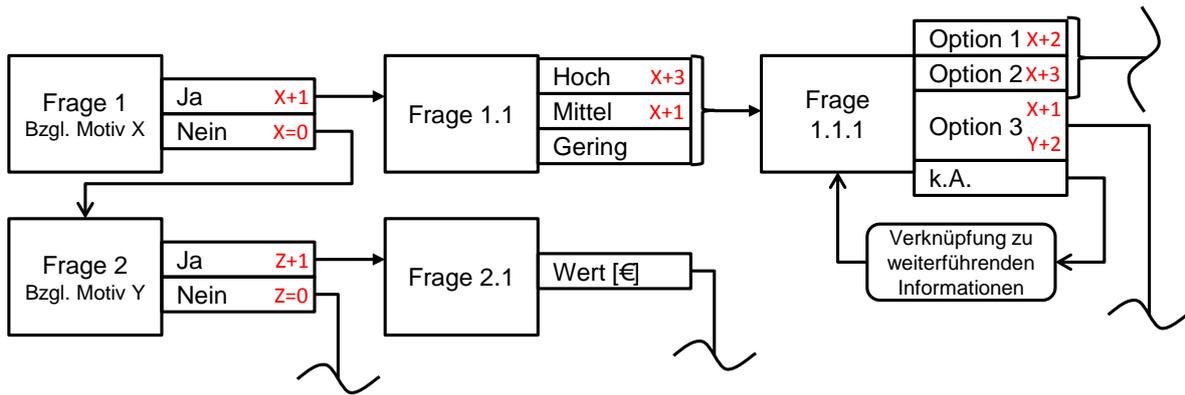


Abbildung 36: Schematischer Ablauf einer interaktiven Fragesequenz zur Beurteilung der Motivausprägungen X und Y.³⁰⁸

Um für den Entwickler als Anwender die Komplexität zu begrenzen, behandelt und beurteilt er die Relevanz jeweils zu konkreten Anforderungen oder Produkteigenschaften aus einer beschränkten motivspezifischen Perspektive. Diese beispielhafte Beschränkung ist in Abbildung 37 durch die einzelnen grauen Ebenen sowie die jeweiligen motivspezifischen Funktionsverläufe schematisch dargestellt.

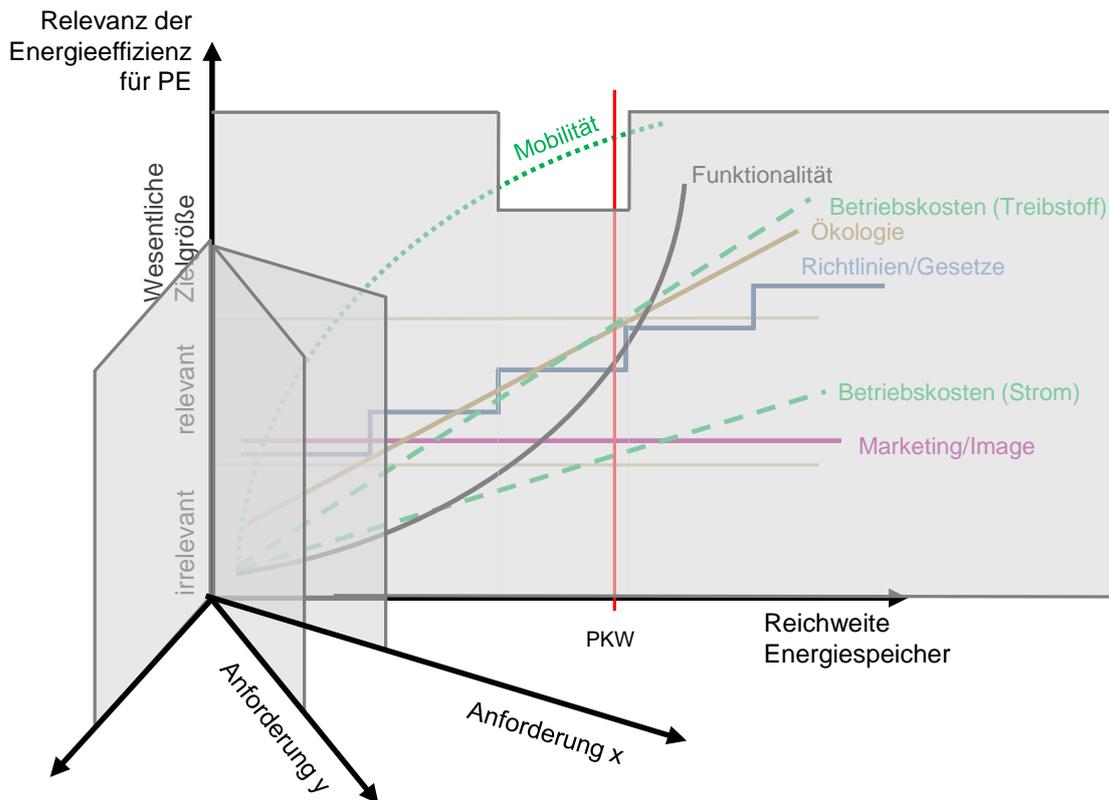


Abbildung 37: Schematische Darstellung eines einzelnen Ausschnitts von Produktanforderung oder -eigenschaft zur Bewertung durch den Produktentwickler.³⁰⁹

³⁰⁸ Nach Albers; Martin et al. 2014, S 7

Die Abbildung zeigt, wie eine Beurteilung der Relevanz der Energieeffizienz aus Sicht des Motivs Mobilität mit Fragen zu Anforderungen wie *Reichweite des Energiespeichers*, *Anforderung x*, *Anforderung y*, erfolgt. Dabei wird die Speicherreichweite nur grob beispielsweise durch Kategorien wie „gering“, „mittel“ und „hoch“ bewertet. Durch die in der Methode bereits hinterlegten qualitativen Zusammenhänge von Anforderungsausprägung und Relevanz wird somit indirekt die Relevanz bewertet. In diesem in Abbildung 37 dargestellten Fall bedeutet eine höhere Anforderung bzgl. der Reichweite eine Zunahme der Relevanz aus Sicht der Mobilität. Zusätzlich können die Anforderungsbeurteilungen eine Auswirkung auf einige Bewertungen der Relevanz aus Sicht der anderen Motive haben.

Bei der Erhebung von Informationen durch eine Befragung ist es nach MAYER vorteilhaft, Fragengruppen zu bilden, um die logischen Zusammenhänge in den Fragen einfacher und besser nachvollziehbar darstellen zu können sowie um den Anwender thematisch strukturiert zu befragen.³¹⁰ Hier scheint es sinnvoll die Fragengruppen anhand der entwickelten Basismotive zu orientieren. Da einzelne Basismotive (bspw. Funktion und Technik) jedoch eine sehr umfassende Vielzahl teilweise unterschiedlicher Einflussfaktoren beinhalten, werden die umfassenderen von ihnen als Teilmotive (bspw. Mobilität und Ergonomie) in eigenen Fragengruppen behandelt.

Die Reihenfolge der Fragengruppe sollte so gewählt werden, dass sowohl der subjektiven Priorisierung der Entwickler, als auch der unternehmensstrategischen Priorisierung der zu berücksichtigenden Aspekte und Motive Rechnung getragen wird. So sollte die Nachvollziehbarkeit der zu beurteilenden Aspekte oder Teilmotive aus Sicht des Anwenders absteigend geordnet werden. Dies bedeutet, dass die ersten Fragengruppen die technischen und funktionalen Aspekte zum Gegenstand haben, da diese vom Produktentwickler üblicherweise am einfachsten nachvollzogen werden können und die Aufmerksamkeit so gewonnen und erhalten werden kann. Bei einer ausführlichen Behandlung von beispielsweise rechtlichen Fragen oder Aspekten möglicher finanzieller Förderungen gleich zu Beginn, besteht die Gefahr den Anwender zu frustrieren oder zumindest seine Aufmerksamkeit zu verlieren. Zusätzlich muss die Reihenfolge der behandelten Fragengruppen die Wichtigkeit der einzelnen Themen aus Sicht der übergeordneten unternehmensstrategischen Perspektive ausreichend berücksichtigen.

³⁰⁹ Vgl. an Martin; Albers et al. 2013

³¹⁰ Vgl. Mayer 2012, dies gilt gleichermaßen für Befragungen im Rahmen empirischer Erhebungen, wie für die Formulierung von Fragen zur systematischen Informationsgewinnung und -interpretation.

Als Kompromiss dieser beiden Anforderungen an die Reihenfolge der Fragengruppen wird diese wie folgt vorgeschlagen:

1. Mobilität
2. Übrige technisch / funktionale Aspekte
3. Betriebskosten / Förderungen
4. Gesetze
5. Außendarstellung
6. Ergonomie
7. Ökologie

Innerhalb der Fragengruppen beantwortet der Anwender nun unterschiedlich lange Reihen von Fragen (zwischen einer und sieben Fragen) zu den einzelnen Basis- oder Teilmotiven (vgl. Abbildung 36). Durch deren Beantwortung – in der Regel mittels der Wahl von vorgegebenen Antwortoptionen – bewertet er indirekt die Relevanz der Energieeffizienz aus Sicht der jeweiligen Motive und im Kontext der verknüpften Produkthanforderungen (vgl. Abbildung 37).

Eine Besonderheit stellt hierbei die Erfassung der Energieeffizienzrelevanz aus Sicht der Betriebskosten dar. Da die notwendigen Informationen nicht nur durch eine einfache Auswahl vorgefertigter Antworten erfasst werden können, werden die zu erwartenden Betriebskosten durch Abfrage der betriebskostenbestimmenden Produkteigenschaften erfasst. Falls diese während der Profilverfindung nicht ausreichend bekannt sind, kann entweder auf voreingestellte Standardwerte zurückgegriffen werden oder die Frage übersprungen werden. Grundsätzlich können alle Angaben jederzeit im weiteren Projektverlauf verfeinert, ergänzt oder verändert werden um die daraus abgeleiteten Informationen kontinuierlich aktualisieren zu können. Können sowohl die energetischen Betriebskosten, als auch der angestrebte Verkaufspreis – beispielsweise auf Basis einer Produktgenerationsentwicklung³¹¹ – bereits abgeschätzt werden, so werden sie einander gegenübergestellt. Der so gebildete Kostenkennwert KW_k (Gl. 6.1) dient als Indikator für die tatsächliche durch energetische Betriebskosten motivierte Relevanz der Energieeffizienz.

$$KW_k = \frac{\text{energetische Betriebskosten}}{\text{Anschaffungskosten}} \quad \text{Gl. 6.1}$$

Durch die exemplarische Auswertung von elf Produkten, deren Nutzungsart, -dauer und -häufigkeit statistisch umfassend untersucht und dokumentiert³¹² wurden, sowie

³¹¹ Vgl. 2.1.3 und Albers 2011b

³¹² Vgl. Centre Urbain 2014

von fünf Produkten, für die eigene Berechnungen angestellt werden, erfolgt eine Einteilung des Kennwertes in Relevanzbewertungsbereiche (vgl. Tabelle 6). Dabei werden die Produkte hinsichtlich ihrer Nennleistung, ihres durchschnittlichen jährlichen Energiebedarfs, ihrer durchschnittlichen Lebensdauer sowie der daraus berechneten jährlichen energetischen Betriebskosten untersucht und der Kennwert durch Gegenüberstellung der mittleren Anschaffungskosten gebildet.³¹³

Aus diesem Kennwert lässt sich die ordinal skalierte Bewertung der Energieeffizienzrelevanz aus Sicht der Betriebskosten, über einen tendenziell logarithmischen Zusammenhang ableiten, wie in Tabelle 6 zu sehen ist.

Tabelle 6: Segmentierung der untersuchten Produkte zur Bestimmung der Relevanzbewertung auf Basis des Kostenkennwertes

Kostenkennwert KW_k		
Ausprägung	Bewertungsänderung der Relevanz bzgl. des Motivs <i>Betriebskosten</i>	Anzahl untersuchter Produkte
$0 < KW_k < 0.1$	+0	3
$0.1 < KW_k < 1$	+3	5
$1 < KW_k < 10$	+5	4
$10 < KW_k$	+8	1

Die in Tabelle 6 vorgeschlagene Bewertung stellt eine mögliche Bewertungsverteilung dar, wie sie auf Basis der untersuchten Produkte sinnvoll erscheint. Jedoch ist es in jedem Fall vorteilhaft, die quantitativen Bewertungen im Branchen-, Unternehmens- oder sogar im jeweiligen Produktkontext zu betrachten und gegebenenfalls anzupassen.

Umfang und Inhalt der Fragen sowie der Antwortoptionen können und sollten im jeweiligen Unternehmenskontext angepasst oder ergänzt werden. Es wird jedoch ein Basissatz an Fragen bereitgestellt (vgl. Anhang, S.193), mit dem die wesentlichen Aspekte abgefragt werden können. Auf Basis dieser Fragen (mit den dokumentierten Hinweisen zum besseren Verständnis der Antwortoptionen) erfolgt die Validierung des Ansatzes in Abschnitt 9.1.

6.2.3 Bewertung der wechselseitigen Einflüsse

Die wechselseitigen Einflüsse verschiedener Motive und einzelner Einflussfaktoren gleicher oder unterschiedlicher Basismotive sind vielfältig und tragen bei einer

³¹³ Vgl. HaCam 2014 (betreute Abschlussarbeit), S. 25

kommentieren. Dies ist beispielhaft für die Berücksichtigung von generischen Wechselwirkungen in Abbildung 38 dargestellt.

Nach Identifikation potenzieller und tatsächlich auftretender Wechselwirkungen, ist eine abschließende Bewertung der quantitativen Auswirkungen dieser Wechselwirkungen auf die resultierende Relevanzveränderung einzelner Basismotive oder der Gesamtmotivation in einzelnen Bewertungsschritten sinnvoll. Zusätzlich ist eine beschreibende Erläuterung der jeweilig bewerteten Wechselwirkungen für eine bessere Nachvollziehbarkeit notwendig (Vgl. Abbildung 39). Bei der Entwicklung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs ergibt sich beispielsweise aus dem Produktprofil die Anforderung, das zu entwickelnde Produkt durch einen mobilen Speicher mit Energie zu versorgen. Wenn jedoch, abhängig vom Nutzenprofil, das Gewicht des Produkts einen großen Einfluss auf dessen Energiebedarf hat, wirkt sich diese Anforderungs- / Ausprägungskombination mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße aus. Wenn nun das Gewicht des Energiespeichers einen relativ hohen Anteil am Gesamtgewicht des Produkts hat und das Gewicht einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf des Produkts aufweist, relativiert sich der Vorteil eines größeren und somit schwereren Energiespeichers, weil dadurch wiederum der Energieaufwand in der Nutzung ansteigt, sodass eine Steigerung der Energieeffizienz eine mögliche Lösung dieses Zielkonflikts darstellt. Umgekehrt ist es zur Erhöhung der Mobilität oder Reichweite gegebenenfalls sinnvoller, einfach einen größeren Speicher zu verwenden, wenn der Einfluss des Gewichts gering oder nicht vorhanden ist, sodass in diesem Fall die Relevanz aus Sicht des funktionalen Motivs geringer zu bewerten wäre. Allerdings führt die Verwendung eines größeren Energiespeichers in der Regel zu einem höheren Preis des Produkts, was die Relevanz der Energieeffizienz aus Sicht der Betriebskosten wiederum steigert. Im Einzelfall käme es nun unter anderem darauf an, welche Gewichtung den beiden Basismotiven Funktion (Mobilität) und Ökonomie zugeordnet wäre und wie die Einzelbewertungen der Einflussfaktoren ausfallen.

Bestehen bereits Ziele oder Anforderungen bezüglich der zu verwendenden Energieform, kann oben beschriebene Wechselwirkung zusätzlich verstärkt oder abgeschwächt werden, da die Korrelation von Energiespeichergröße, -masse und -kosten stark von der Energieform abhängt. So beeinflusst die Kapazitätserhöhung eines elektrischen Speichers das Fahrzeuggewicht sowie die -kosten deutlich mehr, als im Fall eines konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs.

Diese Abhängigkeiten verdeutlichen die Notwendigkeit einer differenzierten Berücksichtigung der einzelnen Motivdimensionen zur systematischen Bewertung einer projektspezifischen (Gesamt-)Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße.

Weiterhin sollten dabei andere, bereits bekannte Anforderungen berücksichtigt werden, um entsprechende Auswirkungen bei der Bewertung der Relevanz angemessen miteinbeziehen zu können.

Wechselwirkung		
Antwort	Erklärung	Einfluss
1 Ja + 1.2 Hoch	Der Energiespeicher hat häufig einen relativ hohen Anteil am Gesamtgewicht des Produkts und das Gewicht hat einen Einfluss auf dessen Energiebedarf	10%
1 Ja + 1.2 Mittel		7%
1 Ja + 1.2 Hoch + 2 Elektrisch	Wenn ein elektrischer Energiespeicher verwendet wird, steigen Kosten und Gewicht bei einem größeren oder leistungsfähigeren Energiespeicher. Die Relevanz der Energieeffizienz steigt entsprechend	8%
1 Ja + 1.2 Mittel + 2 Elektrisch		5%
1.1.1.3 Ja +	Wenn die Lebensdauer des Produktes durch die Energieeffizienz bestimmt wird	10%

Abbildung 39: Auszug aus einer Wechselwirkungsliste mit Nennung der wechselwirkenden Motive oder Fragen (links, durch Klassifikationsschlüssel), der Erklärung (Mitte) sowie der beispielhaften Bewertung des Einflusses auf die Relevanz (rechts).³¹⁸

Um die Teilrelevanzen aus den einzelnen Sichten unterschiedlicher Motive bewerten zu können, bedarf es des systematischen Vorgehensansatzes, welcher es mithilfe eines generischen Teils ermöglicht, die grundsätzlichen Zusammenhänge produkt- und projektunabhängig durch den Entwickler grob beurteilen zu lassen (siehe 6.2.2). Zusätzlich soll es möglich sein durch einen adaptiven Anteil des Vorgehens einzelne Bewertungsoptionen, Gewichtungverteilungen sowie Wechselwirkungsbewertungen unternehmens- und projektspezifisch anzupassen und so Vorgehen und Aussagekraft sukzessive zu verfeinern.

6.2.4 Einfluss von Relevanz und Potenzial auf das Wertschöpfungspotenzial

Ziel des entwickelten Ansatzes ist die unterstützende Anleitung von Entwicklern und Entscheidungsträgern durch ein schrittweises Vorgehen, um die projektspezifische Bedeutung, Relevanz und Eigenheit der Energieeffizienz als Zielgröße zu klären. Zusätzlich sollen potenzielle Chancen und Risiken für den weiteren Entwicklungspro-

³¹⁸ Eine vollständige Liste von identifizierten generischen Wechselwirkungen befindet sich im Anhang (siehe S.187)

zess aufgezeigt werden (Vgl. hierzu auch Abbildung 32). Ein übergeordnetes Ziel der Produktentwicklung und damit wesentliche Chance oder Risiko bei der Verfolgung von Energieeffizienzzielen ist die Beeinflussung des Wertschöpfungspotenzials bezüglich dieser speziellen Zielgröße.

Nach GAUSEMEIER UND WIENDAHL³¹⁹ verfolgen viele deutsche Unternehmen eine Wertschöpfungskonzeption, die unter anderem eine Konzentration auf Produkteigenschaften oder -funktionen mit dem höchstem Differenzierungsgrad beinhaltet und sehen darin das zu hebende Wertschöpfungspotenzial.³²⁰ Derartige Unternehmen werden als besonders innovationsstark bewertet.³¹⁹ Die Energieeffizienz von Produkten ist häufig ein zentrales Differenzierungsmerkmal, insbesondere für deutsche Hersteller gegenüber internationalen Wettbewerbern. So werden die Exportkreditversicherungen³²¹ des Bundes beispielsweise nach Kriterien gewährt, die auch „ökologische, soziale und entwicklungspolitische Gesichtspunkte“³²² beinhalten. Bei der Beurteilung spielt die Energieeffizienz des Produkts häufig eine Schlüsselrolle. Hieraus ziehen deutsche Unternehmen mit technisch hoch entwickelten Produkten mit hoher Wertschöpfung entsprechende Vorteile: Die Gewährung der Exportkreditversicherung ist häufig Grundvoraussetzung für die Realisierung kostenintensiver und damit riskanter Projekte in weniger entwickelten Ländern, ohne die diese Projekte in der Regel nicht realisiert werden könnten. Somit erhält die technologisch höher entwickelte deutsche Wirtschaft oft entsprechende Vorteile gegenüber günstigeren Wettbewerbern (vgl. hierzu auch Abbildung 18, S.50).

Das Wertschöpfungspotenzial bezüglich einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als Entwicklungsziel ist jedoch nur schwer intuitiv abzuschätzen. Näherungsweise kann es jedoch durch den Zusammenhang von Relevanz und technischem Potenzial der Energieeffizienz dargestellt werden (Abbildung 40). Das technische Potenzial beschreibt die Möglichkeit, die Energieeffizienz durch technische Maßnahmen zu verbessern und kann nur unter Betrachtung einer bestehenden oder antizipierten Lösung bewertet werden. Als Maßstab für die Bildung eines prozentualen Potenzialwertes dient dabei das technische Optimum oder eine Benchmark-Lösung. Es wird angenommen, dass das technische Potenzial sich dabei konträr zu der Schwierigkeit der Zielerfüllung verhält. Da bei Verwendung des entwickelten

³¹⁹ Gausemeier; Wiendahl 2011

³²⁰ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.; Institut der Deutschen Wirtschaft Köln et al. 2008 nach Gausemeier; Wiendahl 2011

³²¹ In der praktischen Anwendung auch als Hermesdeckungen bezeichnet

³²² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2008

Ansatzes die Relevanz des Ziels unter Berücksichtigung der gesamten zugrunde liegenden Motivation (als Gesamtheit der auftretenden Motive) differenziert bewertet wird, bildet diese Relevanz gleichsam auch ein Maß für die Bedarfe an einer solchen Lösung aus der Sicht von Markt und eigenem Unternehmen ab.

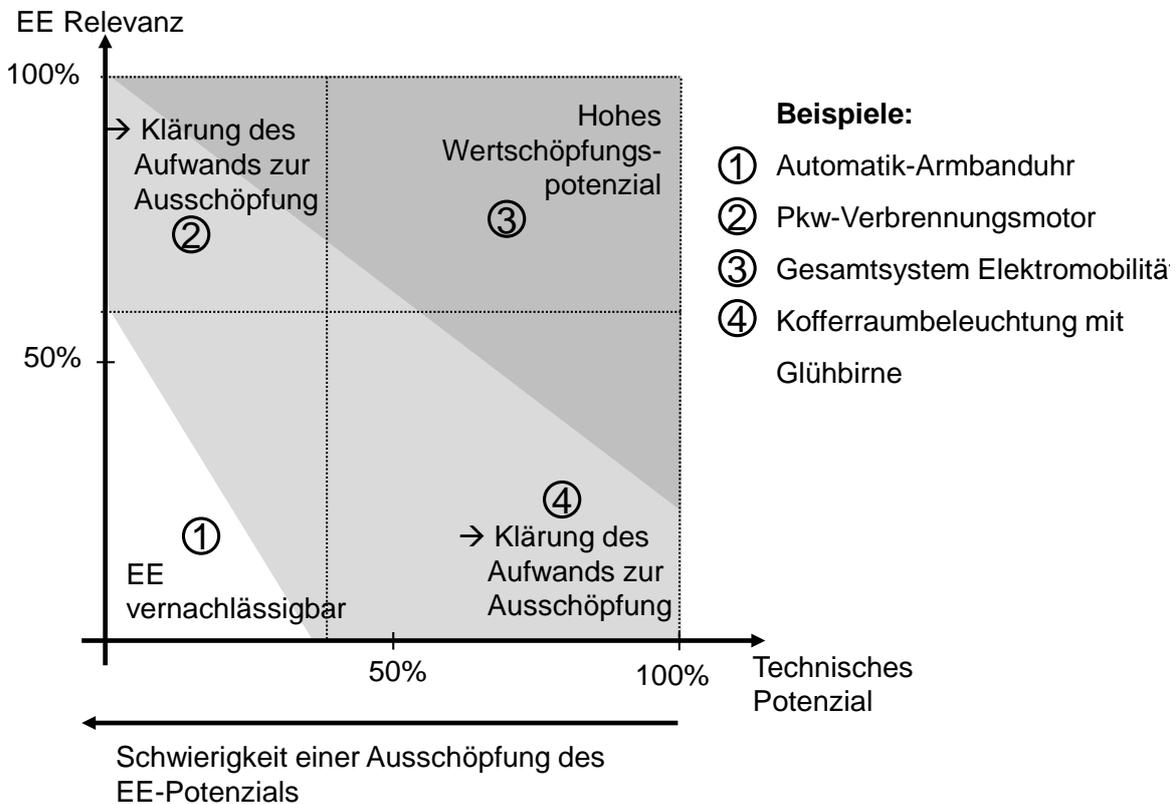


Abbildung 40: Qualitative Darstellung des Wertschöpfungspotenzials bezüglich Energieeffizienz in Abhängigkeit der Relevanz und des technischen Potenzials mit Beispielen.³²³

Demnach birgt die Berücksichtigung eines Ziels mit hoher projektspezifischer Relevanz und hohem technischem Potenzial ein entsprechend ausgeprägtes Wertschöpfungspotenzial. Dieser Zusammenhang ist qualitativ in Abbildung 40 dargestellt, in welcher bereits eine grobe Einteilung der Wertschöpfungsbereiche mit entsprechenden Empfehlungen dargestellt ist.

Durch die Abschätzung des Wertschöpfungspotenzials können Maßnahmen für den weiteren Entwicklungsprozess mit Bezug zu den Zielen der Energieeffizienz abgeleitet werden. Dazu gehören beispielsweise das Hinterfragen oder die Anpassung des zu erwartenden Aufwands zur Ausschöpfung des technischen Potenzials oder der entsprechend einzuplanenden Ressourcen. Im Fall von hoher Relevanz und geringem technischem Potenzial einer Energieeffizienzsteigerung,

³²³ Aus Albers; Martin et al. 2014

sollten zum Beispiel alternative technologische Lösungen betrachtet werden, um so das technische Potenzial durch die Wahl eines größeren, abstrakteren Lösungsraums ggf. anzuheben. Hierbei können wiederum etablierte methodische Hilfsmittel genutzt werden, wie sie in Abschnitt 2.4 vorgestellt wurden.

Bei Kenntnis der entsprechenden Größen auf Subsystem- oder Komponentenebene könnte eine analoge Betrachtung und darauf basierende Abschätzung des Wertschöpfungspotenzials ebenfalls von Interesse sein. Die Validität und Schärfe dieser hierarchischen Zusammenhänge wurde jedoch noch nicht untersucht und wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

6.3 Ableitung von Empfehlungen

Ein wesentlicher Mehrwert, den der zu entwickelnde methodische Ansatz dem Anwender bieten soll, sind Empfehlungen und Hinweise für eine differenzierte Wahrnehmung des Energieeffizienzziels im weiteren Entwicklungsprozess. Basierend auf den zuvor durch die Beantwortung der motivspezifischen Fragengruppen zur Verfügung gestellten Informationen bezüglich bestehender Anforderungen und Randbedingungen, liefert der methodische Ansatz Hinweise zur Wahl geeigneter weiterführender methodischer Unterstützung sowie geeigneter Betrachtungsräume. Der Begriff des Betrachtungsraums schließt dabei sowohl räumliche als auch zeitliche Betrachtungs- oder Systemgrenzen mit ein.

Die Hinweise und Empfehlungen folgen aus der motivspezifischen Relevanzverteilung, der absoluten Relevanzbewertung, oder begründen sich durch einzelne oder wechselwirkende angegebene Informationen (vgl. Abbildung 41). So kann sich eine vergleichbar hohe ermittelte Gesamtrelevanz sehr unterschiedlich zusammensetzen. Je nach Gewichtung der abgefragten Motivgruppen kann beispielsweise eine volle Relevanzbewertung (100%) aus Sicht der Motivgruppen Mobilität, Betriebskosten und Gesetze (Beispiel: verbrennungsmotorisch betriebener Pkw) zu dieser Gesamtrelevanz führen, ebenso wie eine volle Ausprägung von Mobilität und einer Relevanzerhöhung durch stark ausgeprägte Wechselwirkungen unterschiedlicher Motiv Aspekte (Beispiel: Batterieelektrisch betriebener Pkw mit Nutzung kostenloser Ladeinfrastruktur, bei welchem das Gewicht des Energiespeichers die Reichweite stark negativ beeinflusst). Ebendiese projektspezifische Motivverteilung und Relevanzzusammensetzung führen zu unterschiedlichen sinnvollen Interpretationen der Energieeffizienz für das jeweilige Entwicklungsprojekt. In Kombination mit der Gesamtrelevanz bilden sie die maßgebliche Grundlage für die Empfehlungen sowie für das projektspezifisch differenzierte Verständnis der Energieeffizienz als Zielgröße durch den Entwickler. Aus einzelnen Angaben oder Antworten lassen sich in der Regel nur vergleichsweise triviale Handlungsempfehlungen ableiten. Diese können

dennoch im Sinne einer Checkliste hilfreich zum Beispiel für unerfahrenere Produktentwickler sein.³²⁴

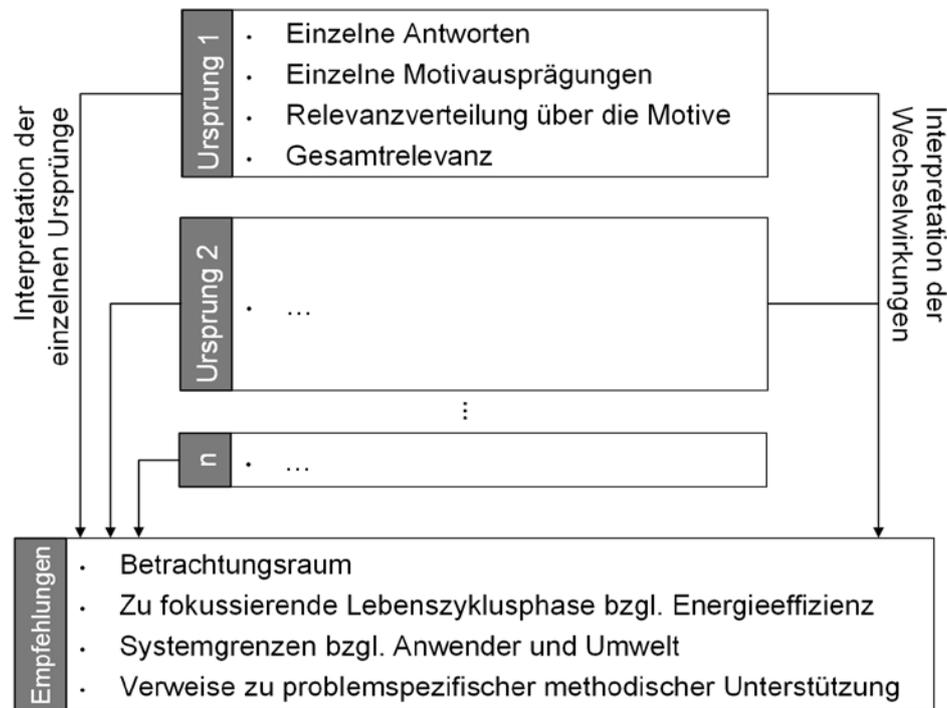


Abbildung 41: Schematische Darstellung möglicher Ursprünge für die Ableitung von Empfehlungen.

Gegenstand der Hinweise sind konkrete Empfehlungen für die weitere Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße sowie eine entsprechende Fokussierung, wie beispielsweise eine Konzentration auf die Nutzungsphase des Produkts, oder das Einbinden der Marketing-Abteilung bei einer hohen Relevanz der Außendarstellungsbezogenen Motive. Außerdem kann auf situativ passende weiterführende Informationsquellen, wie beispielsweise Leitfäden zur Einschätzung der ergonomischen Belastung, oder auf jeweils geeignete methodische Ansätze gemäß den identifizierten Bedarfen verwiesen werden.

6.4 Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit anderen Zielen

Bereits aufgrund der definitorischen Zusammensetzung der Energieeffizienz bestehen enge Wechselwirkungen mit anderen Zielen. So ist die Nutzenbeschreibung als ein Teil der Energieeffizienz bereits eine abstrakte Zusammenfassung verschiedener – produktbezogenen Zielen entsprechender – Kundenanforderungen.

³²⁴ Vgl. Lorenz 2014 (betreute Abschlussarbeit), S.17

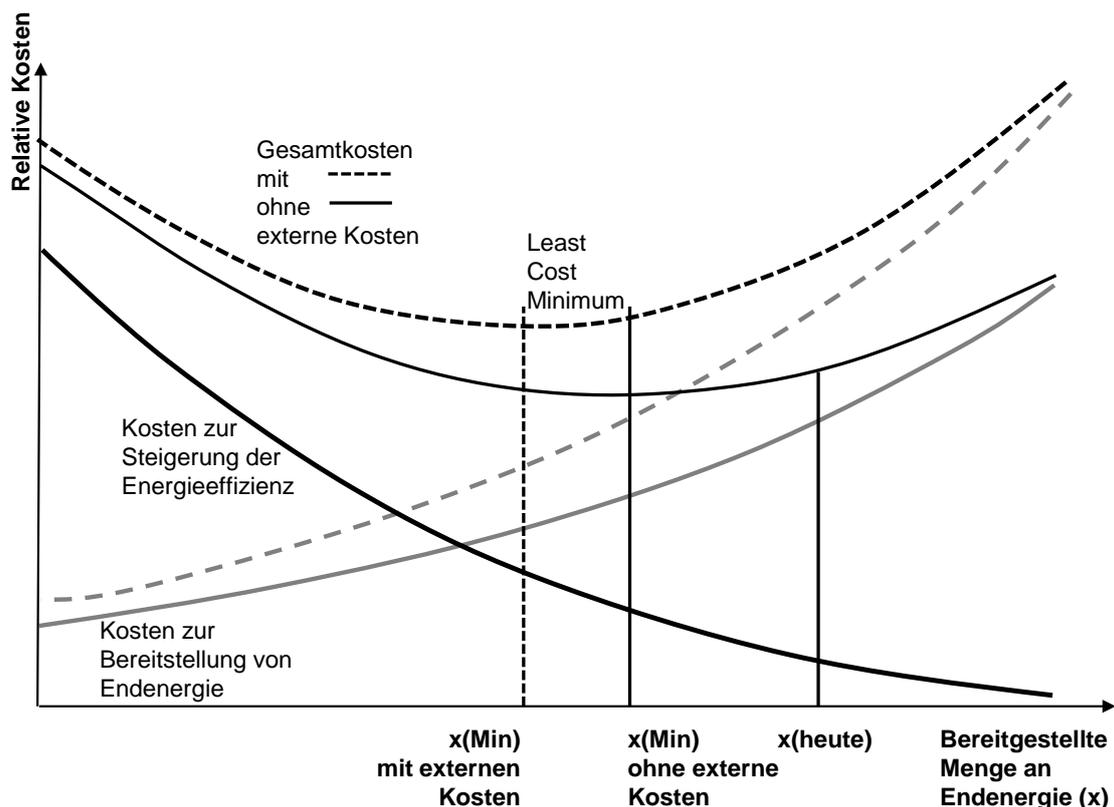


Abbildung 42: Das Optimum der Gesamtkosten als Ergebnis des Substitutionsverhältnisses („tradeoff“) zwischen (End-) Energieversorgung und Energieeffizienz.³²⁵

Weiterhin haben Ziele bezüglich der Energieeffizienz in der Regel direkte und indirekte Auswirkungen auf andere Ziele und die damit verknüpften Produkteigenschaften. Mit dem Produktprofil und der Definition von Produktzielen, wie der Energieeffizienz, werden die hierfür entstehenden Kosten bereits weitestgehend festgelegt. Da jedoch eigene Kostenziele bestehen, ist dies eine beispielhafte und zentrale Wechselwirkung, die möglichst früh berücksichtigt werden sollte.³²⁶ Insbesondere die Abwägung zwischen Gesamtkosten und Energieeffizienzsteigerungen bei der Endenergiebereitstellung wird beispielsweise von PEHNT³²⁷ oder HENNICKE UND SEIFRIED³²⁸ untersucht. Bei einer Steigerung der Energieeffizienz ist hierbei immer das „least Cost Minimum“ anzustreben, wie in Abbildung 42 dargestellt.

Im Rahmen des entwickelten methodischen Ansatzes können auch bestehende oder zu erwartende Wechselwirkungen auf Basis der abgefragten Informationen erkannt

³²⁵ Aus Pehnt 2010, S.35

³²⁶ Vgl. Albers, 2014e

³²⁷ Aus Pehnt 2010 nach Hennicke und Seifried 1996

³²⁸ Hennicke und Seifried 1996

werden. Ziel der Methode muss es daher auch sein, identifizierte oder potenzielle Wechselwirkungen mit anderen Zielen durch die abgeleiteten Empfehlungen zu kommunizieren und die Entwickler bezüglich verknüpfter Risiken und Chancen zu sensibilisieren. Da die kontextfreie Prognose von Zielwechselwirkungen jedoch in unverhältnismäßig hohem Maße unsicherheitsbehaftet ist, kann der generische Teil der Methode einen solchen Mehrwert nicht leisten. Es empfiehlt sich daher die Ableitung von Wechselwirkungshinweisen und entsprechenden Empfehlungen im adaptiven Teil der Methode umzusetzen.

Die Untersuchung von generischen und konkreten Wechselwirkungen zwischen einzelnen Entwicklungszielen ist Gegenstand anderer u. a. im Rahmen dieser Reihe erschienener wissenschaftlicher Arbeiten, wie beispielsweise von MUSCHIK³²⁹, KRUSE³³⁰ oder EILETZ³³¹.

³²⁹ Muschik 2011

³³⁰ Kruse 1996

³³¹ Eiletz 1999

7 Operationalisierung der Energieeffizienz als Zielgröße

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Systematisierung (vgl. Kapitel 6) soll in diesem Kapitel ein Ansatz zur Erstellung von Energieeffizienz-Kenngrößen entwickelt werden, deren spezifischer Einsatzzweck die Quantifizierung von Energieeffizienz-Zielen für die Produktnutzungsphase ist. Die Produktnutzung ist für den Produktentwickler bezüglich der Energieeffizienz häufig die zentrale Produktlebenszyklusphase, da für viele – sogenannte aktive – Produkte während dieser die meiste Energie aufgewendet wird³³² und in welcher sowohl der Kundeneinfluss als auch die Auswirkungen auf den Kunden am größten sind.

Für eine differenzierte Berücksichtigung der Energieeffizienz als Zielgröße in der Produktentwicklung sind – insbesondere zum Zweck der späteren Validierung – eine präzise Definition des jeweiligen Zielverständnisses sowie die Quantifizierung der Ziele eminent wichtig. Um die Energieeffizienz überhaupt produktprofilgerecht adressieren und quantitativ beschreiben zu können, bedarf es hierfür Kenngrößen, die neben den energetischen Aspekten auch Umfang und Grad des mit der Energie erzeugten Nutzens beschreiben. Daher ist die quantitative Abbildung des wesentlichen Produktnutzens zur Beschreibung der Energieeffizienz und primär zur Beschreibung von entsprechenden Zielgrößen zentrales Element dieser Operationalisierung der Energieeffizienz.

Operationalisierung beschreibt eine Wandlung zur Handhabbarkeit und Messbarkeit und bildet damit den Oberbegriff zur messenden Erfassung, Skalierung und Bildung von dafür geeigneten Indikatoren. Die Operationalisierung definiert die Indikatoren, mit welchen ein theoretisches Konstrukt (wie beispielsweise die Energieeffizienz) gemessen werden soll und wie sich die Aggregation des Indikators gestaltet.³³³ Somit bildet sie eine maßgebliche Grundlage für die Repräsentativität und Wiederholbarkeit von Messungen. Ein Indikator ist dabei eine Kenngröße für ein Merkmal, einen Sachverhalt oder ein Phänomen. Prinzipiell stellt er ein stark verkürztes Modell des Sachverhalts dar. Seine Aussagekraft und repräsentative Eigenschaft variieren mit der Güte des zugrunde liegenden Modells sowie der Operationalisierungsvorschrift. Durch die Zuweisung von Werten oder Werteberei-

³³² Vgl. beispielsweise Kaebernick et al. 2003 oder Domingo; Mathieux et al. 2010

³³³ Vgl. TU Dresden 2014

chen ermöglicht ein Indikator beispielsweise die Abbildung von Zielen, Verläufen oder Schwellwerten.

Aufbauend auf den im Rahmen der Systematisierung gewonnenen Informationen bezüglich relevanter Betrachtungsräume sowie relevanter Motive für die Energieeffizienzziele, können im Rahmen des Operationalisierungsansatzes die kontextuell und energetisch relevanten Nutzenmerkmale identifiziert werden. In einem nächsten Schritt werden davon geeignete Parameter abgeleitet, welche die Nutzenmerkmale hinreichend gut abbilden, sowie ein operationales Bezugsmerkmal ausgewählt. Durch eine Gewichtung der Nutzenmerkmale beziehungsweise der abbildenden Parameter sowie durch die Definition von Nutzwertfunktionen kann schließlich der Indikator zur Abbildung der nutzenprofilorientierten Energieeffizienzziele (Utility-Based Energy Efficiency Index – UBEEI) zusammengefasst werden. Diese Zusammenhänge und das damit verknüpfte prozessuale Vorgehen sind in Abbildung 43 schematisch dargestellt.

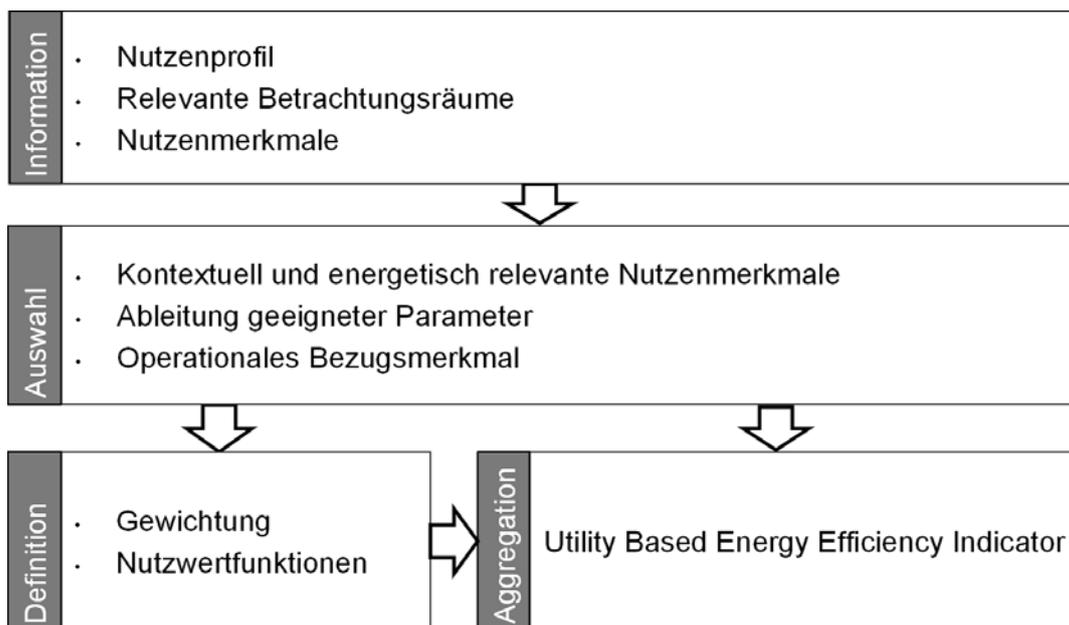


Abbildung 43: Prinzipieller Ablauf des methodischen Ansatzes zur Operationalisierung der Energieeffizienz als Zielgröße.³³⁴

Dies kann erneut am Beispiel einem batterieelektrisch betriebenen Pkw erläutert werden: Der relevante Betrachtungsraum sei der Antriebsstrang („tank-to-wheel“) während der Produktnutzungsphase. Die entsprechenden Nutzenmerkmale seien beispielsweise Beschleunigungswerte, Höchstgeschwindigkeit, und die Fahrzeugreichweite. Diese wären gemäß den nutzenprofil- und herstellerseitig bestehenden

³³⁴ Nach Martin; Albers et al. 2013, S.7

Sichten relativ zueinander zu gewichten, beispielsweise Höchstgeschwindigkeit 1 : Maximalbeschleunigung 2 : Reichweite 4. Mittels Nutzenfunktionen ist dann die Wertigkeit der Zielerfüllung über die Ausprägung der Anforderungen zu definieren (vgl. 2.3.3, Abbildung 16). Als Bezugsmerkmale bietet sich die unter definierten Randbedingungen³³⁵ zurückzulegende Strecke an. Darauf basierend könnte der Zielindikator zusammengestellt werden, was in Abschnitt 7.4 näher erläutert wird.

Für die im Folgenden behandelten Bewertungen des Produktnutzens (7.2) und des energetischen Aufwands (7.3) in der Effizienzformulierung ist eine Verwendung von Referenzzyklen (7.1) für die Wertebelegung von Indikatoren hilfreich oder unter bestimmten Voraussetzungen sogar notwendig.

7.1 Referenzzyklen

Die Festlegung und Beschreibung von Zielen bezüglich eines anteilig am Nutzen bestehenden Energieaufwands, bedarf in der Regel einer Definition und Dokumentation von Referenz-Nutzungszyklen. Durch die Verwendung von Referenzzyklen wird bereits ein hohes Maß an Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit gewährleistet. Dadurch soll zumindest die Ausprägung eines Referenzmerkmals des Indikators festgelegt werden. So ist beispielsweise bereits die vergleichsweise einfache Beschreibung des Energieaufwands eines Kraftfahrzeugs in Volumen verbrauchten Kraftstoffs oder Kilowattstunden verbrauchter elektrischer Energie ohne die Angabe der zurückgelegten Strecke und des Fahrtverlaufs weder nachvollziehbar noch wiederholbar oder aussagekräftig.

Durch die Verfügbarkeit von standardisierten Referenzzyklen, wie dem neuen europäischen Fahrzyklus³³⁶ im automobilen Kontext, oder aber Referenz-Belastungszyklen für Rechner und mobile Elektronikartikel wie Smartphones, können Produkte gleicher oder ähnlicher Nutzenprofile unternehmensübergreifend miteinander verglichen werden. Dies ist Voraussetzung für eine zielgerichtete und modellierungsgestützte Entwicklung energiesensitiver oder energieintensiver Produkte, deren Energieeffizienz-relevante Eigenschaften im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses validiert werden sollen.³³⁷ Für einen differenzierten Vergleich elektrifizierter Antriebstopologien hinsichtlich Energieeffizienz wurde am IPEK von KAUFMANN und KLINGLER eine Methode entwickelt, die dies ermöglicht.³³⁸ Dabei werden die Energieeffizienzbeschreibungen bei näherungsweise gleichbleibendem

³³⁵ Siehe Referenzzyklus (Abschnitt 7.1)

³³⁶ NEFZ, im englischen Original NEDC = new european drive cycle

³³⁷ Vgl. Schwarz 2013 und Pirker 2008

³³⁸ Vgl. Kaufmann 2014 (Abschlussarbeit)

Nutzen durch eine Verschiebung der konventionellen bzw. der elektrischen Antriebsanteile interpoliert. Dabei wird die Nutzungswahrscheinlichkeit unterschiedlicher Fahrentfernungen mithilfe des Utility Factors³³⁹ gewichtet verrechnet.

Für eine möglichst günstige Außendarstellung des eigenen Produkts werden die Werte von den Herstellern in der Regel unter einer Minimierung der übrigen, im Referenzzyklus nicht erfassten oder vorgeschriebenen, Nutzenmerkmale ermittelt.³⁴⁰ So werden in der Regel bei der Ermittlung des Fahrzeugverbrauchs sämtliche energieverbrauchenden oder potenziell verbrauchserhöhenden Ausstattungsmerkmale ausgeschaltet oder sogar aus dem Fahrzeug entfernt.³⁴¹ Dies geschieht meist unter Einhaltung der durch die geltenden Vorschriften festgelegten Grenzen.

Für die Definition selbst gesteckter Ziele bezüglich der Energieeffizienz ist eine solche Verzerrung weder notwendig noch sinnvoll. Hierbei gilt es vielmehr den tatsächlich zu realisierenden Produktnutzen hinreichend genau zu beschreiben, sodass er einem zulässigen Energieaufwand gegenübergestellt werden kann. Bestehende oder unternehmensspezifisch geltende Referenzzyklen müssen dafür gegebenenfalls um die Angabe weiterer energierelevanter Nutzenmerkmale ergänzt werden. Dabei gilt es bereits erkannte und untersuchte Schwierigkeiten³⁴² bei der Definition geeigneter Referenzzyklen zu kennen und nach Möglichkeit zu berücksichtigen.

7.2 Beschreibung des Nutzens

Zentraler Ansatz zur quantitativen nutzenprofilorientierten Beschreibung von Energieeffizienzzielen ist die quantitative Abbildung des angestrebten oder geforderten Produktnutzens. Der Nutzen ist dabei nicht global zu formulieren, sondern Nutzenprofil-spezifisch und somit projektspezifisch zu verstehen. Hierfür kann teilweise auf bestehende methodische Ansätze zur Bewertung des Produktnutzens zurückgegriffen werden, wie sie in Abschnitt 2.3.3 vorgestellt werden. Die Festlegung des angestrebten Nutzenprofils im Zielsystem erfolgt in enger Wechselwirkung mit der Ableitung und Beschreibung eines entsprechenden Produktprofils aus dem Markt³⁴³. Für eine frühe und gezielte Berücksichtigung der Energieeffizienz als zu differenzierendes Entwicklungsziel ist es nach erfolgter

³³⁹ Vgl. Referenzzyklen nach SAE J1711

³⁴⁰ Vgl. Abschnitt 2.5.2

³⁴¹ Vgl. Dings 2013

³⁴² Vgl. Domingo; Brissaud et al. 2013

³⁴³ Vgl. Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3

Relevanzbewertung und -prüfung³⁴⁴ empfehlenswert, das Nutzenprofil detaillierter zu definieren. Dies geschieht, indem die einzelnen Nutzenmerkmale erfasst, ihre relative Bedeutung bewertet sowie ihre angestrebte Ausprägung qualitativ und quantitativ beschrieben wird.

7.2.1 Auswahl der Merkmale zur Nutzenquantifizierung

Der angestrebte Nutzwert eines Produkts orientiert sich in der Regel eng an den damit verknüpften Kundenanforderungen. Daher kann das Nutzenprofil nicht ausschließlich auf der Erfüllung einer einzelnen Hauptproduktfunktion beruhen, da diese die dem Profil zugrunde liegenden Anforderungen nicht umfassend abdecken kann und somit die Effektivität einer Lösung nicht zu beschreiben vermag.³⁴⁵ Daher ist es wichtig, nutzenprofil- und projektspezifische Nutzenmerkmale zu berücksichtigen, um aussagekräftige und zielorientierte Kenngrößen entwickeln zu können.

Die Auswahl der Anforderungen und Merkmale, welche zur Nutzenquantifizierung herangezogen werden, kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Eine erste Analyse und Priorisierung der Anforderungen bietet sich beispielsweise mittels einer Conjoint-Analyse an. Eine Überführung von Teilzielen in Anforderungen zu technischen Systemgrößen kann dann in Anlehnung an die ersten Schritte des Quality Function Deployments³⁴⁶ erfolgen. Hierbei werden die wesentlichen Anforderungen an das Produkt während der Produktnutzungsphase, üblicherweise unter Betonung der Kundensicht, gezielt berücksichtigt. Diese werden ebenfalls aus Kundensicht gewichtet und im House of Quality den technischen Qualitäts- und Nutzenmerkmalen gegenübergestellt, um ihre Beeinflussung zu bewerten.

Durch die Bewertung der Bedeutung der einzelnen Nutzenmerkmale für die Erfüllung der betrachteten Anforderungen erfolgt eine Rangfolge der Nutzenmerkmale. Die Auswahl der Merkmale, die im weiteren Verlauf zur Nutzendarstellung herangezogen werden sollen, kann dann durch Kombination dreier Kriterien erfolgen:

- Zunächst sollten diejenigen Nutzenaspekte fokussiert werden, welchen im Rahmen der vorhergehenden systematischen Relevanzbewertung eine besondere Relevanz zugeordnet werden konnte.
- Außerdem kann ein Schwellwert bezüglich der relativen Bedeutung definiert werden, sodass nur ein bestimmter Anteil der Merkmale höheren Rangs, also

³⁴⁴ Vgl. Kapitel 6

³⁴⁵ Vgl. Albers, 2012

³⁴⁶ Vgl. Abschnitt 2.3.3

diejenigen, die wichtiger für die Anforderungserfüllung sind, miteinbezogen werden. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn eine zu hohe Anzahl an Merkmalen die Handhabbarkeit oder Übersichtlichkeit der Zieldarstellung einschränken oder ihr Verhältnis zur Zielrelevanz unangemessen scheint.

- Schließlich sollten die Merkmale für eine höhere Aussagekraft des so entwickelten Indikators hinsichtlich ihrer energetischen Relevanz beurteilt werden. Die Schwierigkeit einer Beurteilung der energetischen Relevanz ist stark abhängig vom Produktreifegrad, insbesondere zu Beginn des Produktentstehungsprozesses, der in der Regel auf einem stark konzeptionell gehaltenen Abstraktionsniveau stattfindet. Üblicherweise kann dabei jedoch auf Vorwissen im Sinne einer Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS³⁴⁷ zurückgegriffen werden. Alternativ können mithilfe des methodischen Ansatzes gezielt bereits verfügbare Produktgenerationen analysiert werden, um Erfahrungswissen zu sammeln. Liegen keine ausreichenden Erfahrungen oder Erwartungswerte bezüglich der energetischen Relevanz der einzelnen Nutzenmerkmale vor, so kann eine intersubjektive Bewertung dieser Zusammenhänge entweder durch entsprechende Experten erfolgen, oder dieser Priorisierungsschritt wird bewusst übergangen, gegebenenfalls zum Preis einer größeren Zahl an handzuhabenden Merkmalen.

Dies soll im Folgenden an einem Beispiel erläutert werden, welches sich, in Anlehnung an MARTIN ET AL.³⁴⁸, an der Entwicklung eines Elektrofahrzeugs für Autobahn und Stadtverkehr im Projekt „REM 2030“³⁴⁹ orientiert:

Die für die Erfüllung der wesentlichen Anforderungen notwendigen Nutzenmerkmale eines rein elektrisch oder hybridisch angetriebenen PKWs sind zu zahlreich, als sie alle sinnvoll für eine Zielsetzung der Energieeffizienz miteinbeziehen zu können. Basierend auf der differenzierten Untersuchung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße wird primär die Nutzungsphase des Produkts betrachtet. Es seien beispielsweise die Anzahl der Sitzplätze, die lokal verursachten Emissionen (inklusive eines etwaigen Range-Extenders), die Außenwirkung³⁵⁰, das Fahrverhalten und der Komfort des Fahrzeugs eine Auswahl dieser Merkmale für ein

³⁴⁷ Vgl. Albers 2011b

³⁴⁸ Vgl. Martin; Albers et al. 2013, S.8ff

³⁴⁹ Das Innovationscluster Regional ECO Mobility 2030 ist ein gemeinsames Projekt der Fraunhofer-Institute ICT, IOSB, ISI und IWM, und des Zentrums Mobilitätssysteme am Karlsruher Institut für Technologie

³⁵⁰ Die Außenwirkung beschreibt an dieser Stelle ausschließlich die visuelle Erscheinung, nicht jedoch die übrigen Aspekte der Außendarstellung, welche Energieeffizienzrelevant wären.

bestimmtes Nutzenprofil in Anlehnung an die Zielsetzung des Projekts. Eine Bewertung der energetischen Relevanz bei bekannten Zusammenhängen führt nun zu einer Vernachlässigung der Außenwirkung für die weitere Betrachtung im Sinne einer Energieeffizienzzielformulierung. Eine anschließende Bewertung der Rangfolge führt zu der Letztplatzierung des Fahrzeugkomforts. Daher wird dieser beispielhaft für die Nutzenquantifizierung vernachlässigt und zur Gegenüberstellung eines energetischen Aufwands nur noch die Merkmale Personenzahl, Abgasemissionen und Fahrverhalten berücksichtigt.

Bei der Auswahl der Nutzenmerkmale ist es allgemein anzustreben, direkte Abhängigkeiten unter ihnen zu vermeiden. Für eine bessere Übersichtlichkeit und eine konsistente Bewertung bietet es sich außerdem an, hohe inhaltliche Überschneidungen durch die Integration von Merkmalen zu umgehen. Beispielsweise seien das Ladevolumen eines Lastkraftwagens sowie seine Gesamtlänge die zu berücksichtigenden Nutzenmerkmale, so hängen diese direkt miteinander zusammen. Aus Gründen der direkten energetischen Relevanz könnten beispielsweise die Querschnittsfläche des Laderaums als ein Merkmal, und die Gesamtlänge als ein anderes Merkmal verwendet werden, womit indirekt auch das Ladevolumen weitestgehend bestimmt wird, jedoch keine direkte Abhängigkeit der beiden Merkmale zueinander besteht.

Im Anschluss an die Auswahl ist eine kritische Überprüfung der Repräsentativität der ausgewählten Merkmale sowie ihrer ausreichenden energetischen Relevanz zu empfehlen und gegebenenfalls der Auswahlprozess zu erweitern oder zu wiederholen.

7.2.2 Gewichtung, Bewertung und Aggregation der Nutzenmerkmale

Im Folgenden werden die ausgewählten Nutzenmerkmale zu einer quantifizierbaren Gesamtbeschreibung des Nutzwertes zusammengefasst. Hierfür eignen sich prinzipiell unterschiedliche Ansätze. In Sonderfällen können gegebenenfalls bereits mathematisch beschriebene Modelle existieren, die das zu entwickelnde Produkt mit den entsprechenden Nutzenmerkmalen ausreichend genau abbilden. In diesem Fall können die Wechselwirkungen unter den Merkmalen ebenfalls modelliert oder die entsprechenden Auswirkungen gezielt untersucht werden, wie beispielsweise im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung. Eine solche Möglichkeit ist bei der Berücksichtigung vielfältiger Kundenanforderungen zur Beschreibung des tatsächlichen Produktnutzens insbesondere in einem frühen Entwicklungsstadium jedoch die Ausnahme und wird daher nicht näher betrachtet.

In den meisten Fällen jedoch bietet sich eine Aggregation der Nutzenmerkmale nach einfachen Vorschriften an, die eine quantitative Zielsetzung bezüglich eines

Gesamtnutzens zumindest ermöglichen. So basieren beispielsweise viele Methoden zur Entscheidungsunterstützung auf dem Ansatz einer Abbildung von Präferenzen durch implizite oder explizite Nutzenfunktionen.³⁵¹ Zu den darauf aufbauenden Vorgehen gehören beispielsweise die Nutzwertanalyse oder Analytische Hierarchie- und Netzwerk-Prozesse aber auch die Conjoint-Analyse. Nach OBERSCHMIDT sind „die nutzentheoretisch basierten Methoden (...) grundsätzlich dadurch charakterisiert, dass der Entscheidungsträger eine genaue Vorstellung über den Nutzen der Kriterien-Ausprägungen hat und in der Lage ist, Kriterien-Gewichtungen entsprechend seiner Präferenzen in eindeutiger Weise auszudrücken.“³⁵² Dabei werden die Nachteile zum Beispiel in einem relativ hohen Informationsverlust durch die Aggregation gesehen. Da diese Methoden jedoch vergleichsweise einfach zu verstehen, anzuwenden, und somit einfach nachzuvollziehen sind, finden sie in der Praxis sehr häufig Anwendung³⁵² und bieten sich auch für den Einsatz in dem hier behandelten Kontext an.

Einer der am häufigsten verwendeten Ansätze zur Abbildung des Nutzwertes ist die SAW-Technik³⁵³. Dabei wird der Gesamtnutzen durch die Summe der gewichteten Teilnutzen dargestellt. Um ein angemessenes und konsistentes Maß an Informationsschärfe anzustreben und somit nicht stellenweise mit Mehraufwand einen Schärfegrad zu erarbeiten, der durch zwangsläufige Informationsunschärfe an anderer Stelle³⁵⁴ in der Summe keinen Mehrwert bieten kann, wird empfohlen die Nutzenbeschreibung als Teil der Energieeffizienzformulierung basierend auf SAW-Technik und Nutzwertanalyse (Vgl. 2.3.3) zu erfassen.

Um den Gesamtnutzen konsistent als Summe der Teilnutzen modellieren zu können, muss jedoch eine weitgehende Unabhängigkeit der Teilnutzen untereinander vorausgesetzt werden. Daher müssen identifizierte Wechselwirkungen³⁵⁵ aufgelöst werden (vgl. S.124) Im Fall von konkurrierenden Merkmalen kann dies nach ZANGEMEISTER³⁵⁶ beispielsweise durch priorisierende Gewichtung oder die Festlegung von Sollgrenzen für die Zielerfüllung erfolgen. Für symmetrische

³⁵¹ Vgl. Oberschmidt 2010

³⁵² Vgl. Oberschmidt 2010, S.59

³⁵³ Englisch "Simple Additive Weighting": Einfache addierende Gewichtung

³⁵⁴ Dies bezieht sich primär auf das konzeptionelle Abstraktionsniveau der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Ziele, sowie die unschärfebehaftete Modellierung der Nutzenfunktionen

³⁵⁵ Im einfachsten Fall werden Wechselwirkungen zumindest qualitativ bereits im „Dach des House of Quality“ im Rahmen des Quality Function Deployment erkannt

³⁵⁶ Vgl. Zangemeister 1976

Komplementaritäten schlägt BAUER³⁵⁷ eine Zusammenfassung der Merkmale vor, wie es bereits in Abschnitt 7.2.1 als Integration von Merkmalen vorgestellt wird.

Eine Gewichtung der angestrebten Ausprägungen der Nutzenmerkmale ist notwendig, um ihrer unterschiedlichen Bedeutung für den Gesamtnutzen gerecht zu werden. Die Gewichtung sollte dabei möglichst eine intersubjektive und unternehmensrelevante Beurteilung der relativen Merkmalsbedeutung darstellen, da sie einen maßgeblichen Einfluss auf die abschließende quantitative Beschreibung des Nutzens und somit auch der Energieeffizienz hat. Aus der Vielzahl existierender Gewichtungsansätze wird ein einfaches Verfahren, wie beispielsweise die direkte Vergabe von Gewichten durch das Projektteam, ausgewählt, mit welchem die relative Bedeutung der Nutzenmerkmale zueinander bewertet werden können. Auch hierbei sollte ein angemessenes Schärfe- zu Aufwandverhältnis angestrebt werden. Die Vergabe von Gewichten kann beispielsweise im Verlauf der im vorherigen Abschnitt beschriebenen hierarchischen Zielstrukturierung erfolgen.³⁵⁸ Als Basis können dabei Gewichte aus einer Conjoint-Analyse dienen, die eine ausreichende Kundenorientierung sicherstellen. Eine ausführliche Betrachtung unterschiedlicher existierender Verfahren zur Gewichtung von Zielen und Kriterien findet man beispielsweise bei BAUER³⁵⁹, HABERFELLNER ET AL.³⁶⁰ und OBERSCHMIDT³⁶¹.

Im Allgemeinen gilt, je abstrakter die Formulierung von Nutzen und energetischem Aufwand, desto offener ist der Lösungsraum, der zur Erfüllung des durch den Indikator quantifizierten Energieeffizienzziels führt.

Für eine Bewertung der Teilzielerfüllung ist die Abbildung des Zielerfüllungsgrades (Nutzwert) über der Nutzenmerkmalsausprägung (Parameter) hilfreich.³⁶² Nach HABERFELLNER ET AL. dient dies der Visualisierung der Ziel- oder Anforderungsverläufe und unterstützt eine transparente Wertvorstellung und somit eine differenzierte Dokumentation der Zielentscheidungen.

³⁵⁷ Vgl. Bauer 2009, S. 36 in Anlehnung an Zangemeister 1976

³⁵⁸ Siehe auch 2.3.4

³⁵⁹ Vgl. Bauer 2009

³⁶⁰ Vgl. Habereffner et al. 2012

³⁶¹ Vgl. Oberschmidt 2010

³⁶² Vgl. Martin; Albers et al. 2013 oder Habereffner et al. 2012, S.282

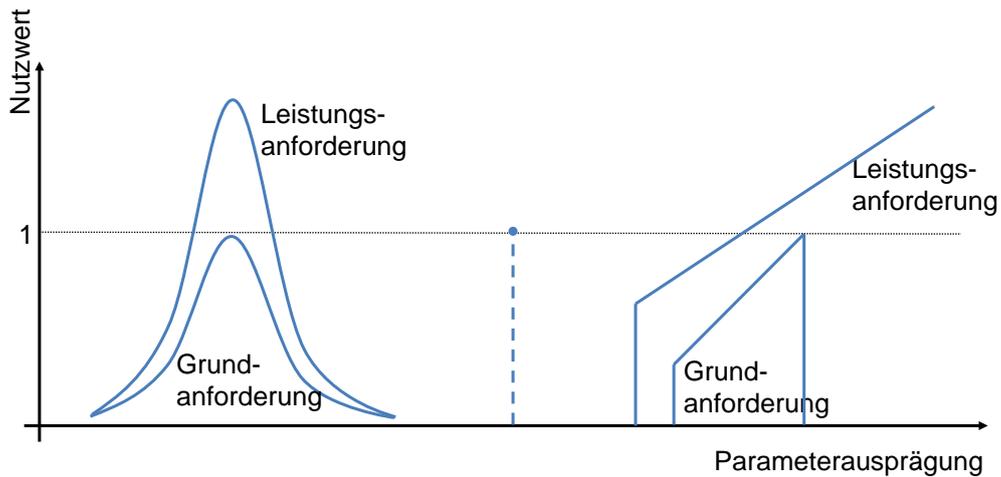


Abbildung 44: Verschiedene Nutzenfunktionen zu unterschiedlichen Anforderungsarten: Zielforderung (links), Punktforderung (Mitte), Bereichsforderung (rechts).³⁶³

Dabei werden verschiedene Verläufe von Nutzenfunktionen durch die unterschiedlichen zugrunde liegenden Anforderungsarten bedingt. In Abbildung 44 sind die prinzipiell auftretenden Nutzenfunktionen³⁶⁴ für Ziel-, Punkt- und Bereichsforderungen dargestellt. Konkrete Ausprägungen dieser Funktionen sind für die in Abschnitt 7.2.1 aufgeführten beispielhaften Nutzenmerkmale in Abbildung 45 dargestellt. Ein Nutzwert von 1 entspricht dabei einer vollen Zielerfüllung.

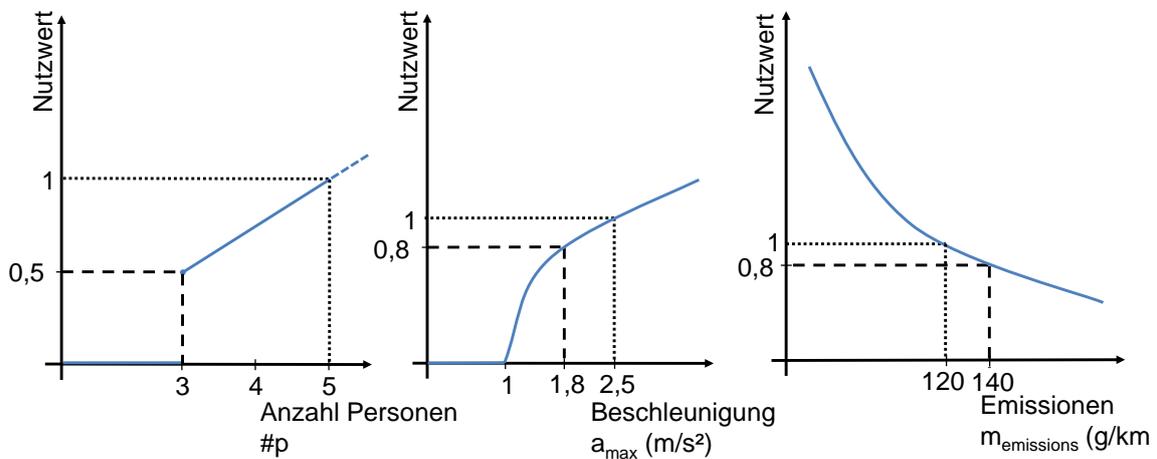


Abbildung 45: Beispielhafte Nutzenfunktionen zu Anforderungen an einen Pkw.³⁶⁵

Die Quantifizierung der Nutzenziele selbst erfolgt nach einem Ablaufschema in Anlehnung an Vorgehensmodelle zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung³⁶⁶.

³⁶³ Nach Martin; Albers et al. 2013, S.7

³⁶⁴ Umfassendere Übersichten zu möglichen Funktionsverläufen werden u.a. von Deubel 2007 (S.51ff) vorgestellt.

³⁶⁵ Nach Martin; Albers et al. 2013, S.8

³⁶⁶ Vgl. Geldermann, 2008

Tabelle 7: Vorgehensschritte zur Quantifizierung der Nutzenziele und empfohlene Methoden

Vorgehensschritt	Empfohlene Methode
1. Hierarchische Aufstellung der Ziele und Merkmale	Nutzwertanalyse und SAW-Technik
2. Festlegung der Ziele und der Gewichtungen	Hierarchische Zielstrukturierung auf Basis einer Conjoint-Analyse
3. Aufstellen von Nutzenfunktionen	Nutzwertfunktionen
4. Bewertung und ggf. Sensitivitätsanalyse zur Formulierung einer Zielvorstellung der Energieeffizienz	Iterative Verfeinerung oder Radar-chart und SMOP-Analyse

Die schließliche Formulierung des Nutzens gemäß dem SAW-Ansatz ergibt sich somit zu

$$\text{Nutzen} = \frac{1}{\sum g_i} \left(\sum g_i * f(NM_i) \right) \quad \text{Gl. 7.1}$$

wobei g_i die jeweiligen Gewichtungsfaktoren und NM_i die Nutzenmerkmale darstellt (vgl. Gl. 7.1).

7.3 Beschreibung des Energieaufwands

Bei der Definition des Zielsystems, insbesondere im Fall einer Berücksichtigung der Energieeffizienz als relevante Zielgröße, muss in jedem Fall die Angabe einer Energiemenge erfolgen, welche für die Erbringungen eines bestimmten (Produkt-) Nutzens angemessen scheint bzw. angestrebt wird. Die Zielsetzung kann dabei, ebenso wie Vergleich und Beurteilung der energetischen Qualität von Systemen sowie ihrer technischen und wirtschaftlichen Optimierung, nur auf Basis von Energiekenngößen erfolgen.³⁶⁷ Die zur Beschreibung des Energieaufwands heranzuziehende Energieform ist dabei als Systemenergie nach VDI 4661 zu verstehen. Die Beschreibung des Energieaufwands erfolgt üblicherweise durch Angabe einer Energiemenge relativ zu einem Bezugsmerkmal. Die Energiemenge wird dabei entweder durch eine Menge von Endenergie beispielsweise in Wh beschrieben oder aber durch eine Menge eines weitestgehend standardisierten Endenergieträgers, wie beispielsweise in Liter Dieselmotorkraftstoff. Da die Endenergie weder thermisch genutzte Reststoffe noch in Eigenaufkommen gewonnene Energieanteile aus regenerativen Quellen beinhaltet³⁶⁸, sind diese gegebenenfalls

³⁶⁷ Vgl. VDI 4661 (2003), S.3

³⁶⁸ Vgl. VDI 4661 (2003), S.11

zusätzlich miteinzubeziehen, da sie wohl den Energieaufwand zur Beschreibung der Energieeffizienz beeinflussen, auch wenn sie nicht als Gegenstand des kommerziellen Energiehandels betrachtet werden.

Das zur Gegenüberstellung verwendete Bezugsmerkmal sollte nach Möglichkeit kein Nutzenmerkmal darstellen, da ansonsten unerwünschte Wechselwirkungen auftreten würden. So ist beispielsweise im automobilen Kontext die Angabe eines Energieaufwands in Kraftstoffvolumen pro Strecke (beispielsweise 100km) gebräuchlich. Die repräsentativ gefahrene Bezugsstrecke selbst stellt nicht die Fahrzeugreichweite und somit kein Nutzenmerkmal dar.

Als Bezugsmerkmal zur Beschreibung des Energieaufwands wird also eine kardinal quantifizierbare technische Größe verwendet, die im stationären Betrieb einen direkten (nach Möglichkeit linearen) Zusammenhang zum Energieaufwand aufweist. Dies entspricht grundsätzlich dem Gedanken des spezifischen Energieverbrauchs nach VDI 4661, allerdings unter Verwendung von gegebenenfalls erweiterten Endenergiegrößen anstelle von primärenergetischen Angaben.

Setzt sich der Energieaufwand aus unterschiedlichen Energieanteilen zusammen, so sind die bestehenden Vorgehen zur Zusammenfassung dieser Anteile, wie zum Beispiel nach VDI 4600³⁶⁹ oder KAUFMANN³⁷⁰ anzuwenden beziehungsweise zu berücksichtigen. Soll zusätzlich eine bessere Vergleichbarkeit bei Einsatz anderer Energieformen ermöglicht werden, so können die Anteile entsprechender Wertigkeit unterschiedlich gewichtet werden, um beispielsweise einem regenerativen Energieanteil weniger Gewicht beizumessen, ähnlich der Bewertung von Energieträgern nach VDI 4661. Da diese Thematik in den genannten Arbeiten ausführlich behandelt wird, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter auf die damit potenziell verbundenen Problematiken eingegangen.

Die Beschreibung des Energieaufwands erfolgt demnach, bis auf die Verwendung einer explizit nicht-nutzenmerkmalbezogenen Bezugsgröße, auf einfache und etablierte Weise, was der praktischen Anwendbarkeit des Indikators zugutekommen soll.

7.4 Bildung des Utility-based Energy Efficiency Indicators (UBEEI)

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden im Rahmen der Energieeffizienzzielsetzung die im Zielsystem festgelegten Nutzenmerkmale und das sich daraus insgesamt ergebende Nutzenprofil einem dafür zulässigen oder angestrebten

³⁶⁹ VDI 4600 (2012)

³⁷⁰ Kaufmann 2014 (Abschlussarbeit)

energetischen Aufwand (ggf. unter Angabe eines Referenzzyklus) gegenübergestellt. Ein solches Verhältnis beschreibt die Energieeffizienz in der Nutzungsphase in ihrem eigentlichen Sinne und muss in Form von Kennzahlen und Indikatoren aggregiert und quantifiziert werden.

Energieeffizienzziele sollten dabei nicht einfach in bestehenden Indikatoren ausgedrückt werden, die zu anderen Zwecken entwickelt wurden. Vielmehr ist es sinnvoll, den Energieeffizienzbegriff zu seiner eigentlichen Bedeutung zurückzuführen und in Form eines entsprechenden Indikators abzubilden, der Ziele des Produktnutzens über einem zulässigen oder angestrebten Energieaufwand beschreibt. Dabei ist die differenzierte Auswahl der relevanten Nutzenmerkmale sowie der zu berücksichtigenden Betrachtungsräume oder Systemgrenzen elementar für eine zielorientierte Herangehensweise. Aus diesem Anspruch heraus wird der Utility-based Energy Efficiency Indicator (UBEEI) entwickelt. Die Beschreibung des angestrebten Produktnutzens sowie der Energieaufwendungen wurde in den vorangegangenen Abschnitten behandelt. Diese werden im Folgenden durch eine Aggregationsvorschrift zusammengefasst um damit eine Kenngröße zur zielorientierten und nutzenprofil-spezifischen Formulierung von Energieeffizienzzielen zu ermöglichen und der dritten der wesentlichen Voraussetzungen für Operationalisierbarkeit³⁷¹ zu entsprechen.

Um die Verwendung von Energieeffizienzindikatoren angemessener Abstraktion zu ermöglichen, werden zwei Aggregationsstufen vorgeschlagen: Der vollständige, ausformulierte Indikator hat ein Maximum an Informationsgehalt und beinhaltet das operationale Bezugsmerkmal (*OpBzgM*), welches die Bezugsgröße für den anzugebenden Energieaufwand darstellt, sowie die einzelnen Nutzenmerkmale einschließlich der entsprechenden Gewichtungsfaktoren in expliziter Form. In der zweiten Stufe kann dieser zu einem reduzierten Indikator, beispielsweise für Vergleichszwecke, weiter zusammengefasst werden, sodass nur noch ein Wert mit der Einheit des Bezugsmerkmals im Verhältnis zum energetischen Aufwand steht.³⁷²

Der vollständige Indikator für das in den vorangegangenen Abschnitten verwendete Beispiel des urbanen Kraftfahrzeugs ergibt sich somit zu

³⁷¹ Diese sind Konkretisierbarkeit, Messbarkeit und Aggregierbarkeit. Vgl. 2.5.1

³⁷² Vgl. hierzu Gl. 9.2 (S. 158)

$$\begin{aligned}
 UBEEI_1 &= \frac{OpBzgM \frac{1}{\sum g_i} (\sum g_i f(NM_i))}{\text{energetischer Aufwand}} && \text{Gl. 7.2} \\
 &= \frac{\text{Strecke}(s) \left(\frac{1}{7} (4 f(\#_{\text{personen}}) + 1 f(m_{\text{emission}}) + 2 f(a_{\text{max}})) \right)}{Vol_{\text{Kraftstoff, (equivalent)}}}
 \end{aligned}$$

Der reduzierte Indikator ergibt sich entsprechend durch Zusammenfassen der Nutzenmerkmale zu einem Nutzenfaktor (*Zielwert = 1*) zu

$$\begin{aligned}
 UBEEI_2 &= \frac{OpBzgM \frac{1}{\sum g_i} (\sum g_i f(NM_i))}{\text{energetischer Aufwand}} && \text{Gl. 7.3} \\
 &= \frac{\text{Strecke}(s)}{Vol_{\text{Kraftstoff, (equivalent)}}} \text{Nutzenfaktor}
 \end{aligned}$$

Die Höhe des Indikatorwertes wird dabei jedoch hauptsächlich durch die Wahl der operationalen Bezugsgröße (z.B. Strecke von 1 km oder 100 km) und des zulässigen energetischen Aufwands bestimmt sowie durch die Wahl der zu ihrer Beschreibung verwendeten Einheiten.

Weitere Beispiele für die Zusammensetzung eines solchen Indikators in praktischen Anwendungsfällen werden im Rahmen der Validierung (Abschnitt 9.1) beschrieben.

7.5 Konkrete Zieldefinition

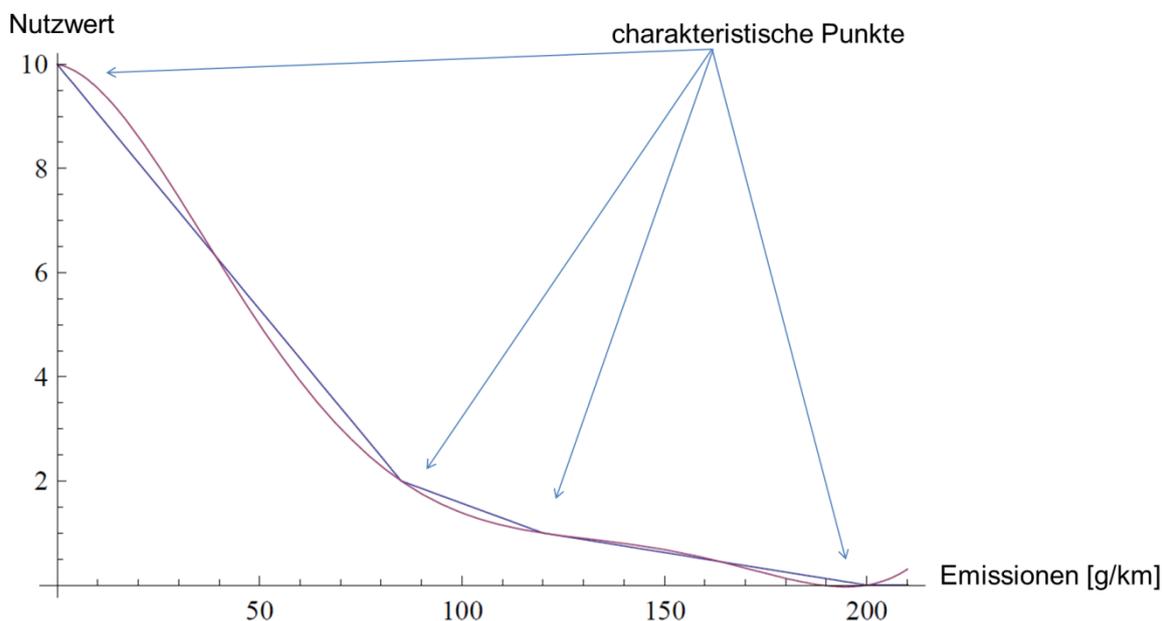
Die angestrebte Nutzenmerkmalsausprägung wird definiert, indem zunächst charakteristische Werte der einzelnen Nutzenmerkmale identifiziert werden. Üblicherweise sind dies zwischen zwei und fünf Werten, wie Extremwerten oder Wendepunkten bezüglich des damit verknüpften Nutzwertes. Für diese Werte wird in einem nächsten Schritt der damit jeweils verknüpfte Nutzwert festgelegt (siehe Tabelle 8). Eine Nutzwertbewertung mit 0 entspricht dabei einer Nichterfüllung einer Muss-Anforderung. Auf Basis dieser charakteristischen Wertepaare können dann die Zielerfüllungsfunktionen durch lineare oder polynomiale Inter- und Extrapolation beschrieben werden.³⁷³

³⁷³ Vgl. auch Ply 2013 (betreute Abschlussarbeit)

Tabelle 8: Beispielhafte Gegenüberstellung von Nutzenmerkmalsausprägungen und Nutzwerten³⁷⁴

CO ₂ -Emissionen [g/km]	Nutzwert
0	10
85	2
120	1
200	0

Welche Form der Inter- oder Extrapolation hierfür gewählt wird, ist nach der Anzahl der definierten charakteristischen Werte und damit der Stützstellen sowie der erwarteten Nutzenverteilung zu entscheiden. In Abbildung 46 ist eine beispielhafte Nutzenfunktion mit vier Stützstellen für unterschiedliche Interpolationsansätze dargestellt. In dem dargestellten Fall ist der Unterschied, insbesondere unter Berücksichtigung der Informationsunschärfe der einzelnen Nutzwertbeurteilungen, zu vernachlässigen. Außerdem treten durch die Verwendung weniger Stützstellen bei der polynomialen Inter- bzw. Extrapolation unerwünschte Randeffekte auf. In einem solchen Fall wäre der lineare Ansatz vorzuziehen.

Abbildung 46: Linearer und polynomialer Ansatz zur Interpolation von vier Stützstellen einer Nutzenfunktion.³⁷⁴³⁷⁴ Nach Ply 2013 (betreute Abschlussarbeit), S.44

Eine naturgemäße und dennoch mitunter schwierige Eigenschaft des entwickelten Indikators (UBEEI) ist, dass er für unterschiedliche Energieeffizienzziele (und entsprechende Lösungen) je nach Aggregationsstufe³⁷⁵ den gleichen Wert annehmen kann. Diese Problematik haben viele Verhältniskennzahlen gemeinsam.³⁷⁶ Hierbei kann nach HABERFELLNER ET AL. die Einführung von Muss- und Mindestzielen helfen. Diese führen beispielsweise zu einer Limitierung des zulässigen Gesamtenergieaufwands oder einzelner Nutzenmerkmale und ermöglichen so eine differenzierte Zielsetzung.

Für eine abschließende Untersuchung der formulierten bzw. definierten Ziele bzgl. der Energieeffizienz empfiehlt sich eine Betrachtung der Zielkonsistenz und -sensitivität. Dies ist im Wesentlichen auf zwei Wegen möglich: Durch eine intuitive und einfache iterative Verfeinerung der Zielwerte, welche jedoch relativ zeitaufwendig sein kann, oder durch die gezielte Berücksichtigung der verknüpften energetischen Aufwände bereits bei der Definition der Nutzenfunktionen. Im letzteren Fall müssen hierfür jedoch bereits Modelle ausreichender Güte verfügbar sein, welche die untersuchten Wechselwirkungen abbilden können. In diesem Fall bieten beispielsweise Radar-charts³⁷⁷ eine hilfreiche Möglichkeit zur Darstellung mehrdimensionaler Ziele. Diese stellen auf radial angeordneten Achsen mit gleichmäßiger Winkelverteilung die jeweiligen Werte dar und erlauben so deren qualitativen Vergleich. Ursprünglich werden sie für die Darstellung von Performance-daten und dem Vergleich zu Benchmarks verwendet.³⁷⁸ Dabei sind die Achsen üblicherweise normiert. Mittels der SMOP-Analyse (Surface Measure of Overall Performance) wird die Fläche unter der eingetragenen Grafik berechnet und als Maß für die Gesamtperformance des betrachteten Systems herangezogen. Eine Gewichtung der einzelnen Performancemerkmale oder -indikatoren ist dabei jedoch nicht möglich.³⁷⁹

³⁷⁵ Entspricht dem Grad des rechnerischen Zusammenfassens der Zahlenwerte.

³⁷⁶ Zum Beispiel der Kosten-Wirksamkeits-Index Vgl. Haberfellner et al. 2012, S. 272f

³⁷⁷ Auch Spinnenwebdiagramme genannt

³⁷⁸ Vgl. Mosley; Mayer 1999

³⁷⁹ Vgl. Förster; Hedrich et al. 2009 und Mosley; Mayer 1999

8 Vorgehensmodell und Referenzmodell

Im Folgenden werden die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse sowie die in den Kapiteln 6 und 7 entwickelten Ansätze zur Systematisierung und Operationalisierung der Energieeffizienz zu einem statischen Vorgehensmodell in Form eines SPALTEN-Prozesses zusammengefasst. Zusätzlich wird ein Referenzmodell für die Profildefinition vorgeschlagen, welches den dynamischen Ablauf der zu berücksichtigenden Produktentstehungsaktivitäten abbildet. Diese sollen den Entwickler in der praktischen Handhabung und Konkretisierung der initialen Zielgröße Energieeffizienz unterstützen. Der vorgehensmethodische Ansatz sowie seine darauf aufbauende Umsetzung in einem Werkzeug (Kapitel 9) sollen zunächst einen generischen Charakter haben. Dementsprechend sind sowohl die verwendeten Begriffe, als auch notwendige Bewertungen zunächst allgemein gehalten, können und sollen jedoch im jeweiligen Unternehmens- oder Projektkontext kontinuierlich angepasst und erweitert werden.

8.1 Vorgehensmodell

Im Rahmen der „Untersuchung zur Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße“ (Kapitel 5) werden durch Befragungen in Entwicklungsabteilungen verschiedener Industrieunternehmen und Branchen Bedarfe für die Unterstützung des Produktentwicklers bei der Handhabung von initialen Energieeffizienzzielen aufgezeigt. Diese Bedarfe sollen nun die Grundlage für die folgende Zusammenfassung der entwicklungsmethodischen Ansätze der Systematisierung und Operationalisierung zu einem durchgängigen Vorgehensmodell bilden:

Die wesentlichen Bedarfe an Unterstützung, welche sich aus der empirischen Studie ergeben oder darin bestätigt werden³⁸⁰, sind:

- methodisch anleitende Unterstützung zur Handhabung der Energieeffizienz
- differenzierte und projektspezifische Bewertung von Relevanz und Potenzial der Energieeffizienz als Zielgröße durch Berücksichtigung unterschiedlicher zugrunde liegender Motive
- Klärung von Systemgrenzen bzw. Betrachtungsräumen zur Energieeffizienzzielsetzung
- Verständnis und Formulierung der Zielgröße Energieeffizienz

³⁸⁰ Vgl. S. 77ff

- Quantifizierung in Kenngrößen

Demnach lässt sich ein auf diese praktischen Bedarfe zugeschnittenes Vorgehen zunächst grob in zwei Abschnitte unterteilen: einen analytischen Anteil und einen darauf aufbauenden Teil mit Synthescharakter. Dabei deckt der analytische Teil im Wesentlichen den Systematisierungsaspekt und der Teil mit synthetisierendem Charakter den Operationalisierungsaspekt, also die Formulierung von operational nutzbaren Zielgrößen, ab. Die Überlagerung dieser Unterteilung mit den einzelnen Schritten des Vorgehensmodells ist schematisch in Abbildung 47 dargestellt und fasst die schematischen Abläufe der Systematisierung (Abbildung 32) und der Operationalisierung (Abbildung 43) zusammen.

Im Einzelnen besteht das Vorgehen aus sieben Elementen, welche sich an den Problemlösungsaktivitäten des SPALTEN-Ansatzes orientieren³⁸¹. Diese werden sequenziell durchlaufen, bieten dabei jedoch eine hohe Flexibilität für die Abbildung auftretender Iterationsschleifen. Die Elemente fassen die wesentlichen Schritte der Systematisierung³⁸² sowie der Operationalisierung³⁸³ der Energieeffizienz integrativ zusammen. Anknüpfungspunkt der beiden übergeordneten Anteile ist die Identifikation relevanter Betrachtungsräume im Rahmen der Lösungsauswahl, welche ein wesentliches Ergebnis der differenzierten Betrachtung der Energieeffizienz im Rahmen der Systematisierung darstellt sowie die Identifikation und Auswahl der relevanten Nutzenmerkmale zur differenzierten und nutzenprofilsspezifischen Beschreibung der Energieeffizienzzielgröße. Die Auswahl geeigneter Nutzenmerkmale erfordert dabei die Kenntnis über zu fokussierende Betrachtungsräume, welche bereits die Systemgrenzen für den weiteren Verlauf vorgeben können. Beispielsweise kann der Betrachtungsraum durch den räumlichen Fokus (z.B. batterieelektrisch betriebener Antriebsstrang, „tank-to-wheel“) und den zu berücksichtigenden Zeitraum (z.B. Produktnutzungsphase) beschrieben sein.³⁸⁴ Die Identifikation dieser Betrachtungsräume basiert jedoch auf einer ausführlichen und differenzierten Berücksichtigung der gesamten Motivationslage zur Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße. Daher werden diese beiden Anknüpfungsschritte in der Problemlösungsaktivität *Lösungsauswahl* zusammengefasst (vgl. Abbildung 47). So bildet dieses Element auch einen wichtigen Ausgangspunkt im Falle eines gegebenenfalls notwendigen iterativen Wiedereinstiegs.

³⁸¹ Vgl. Abschnitt 2.1.2

³⁸² Vgl. Albers; Martin et al. 2014

³⁸³ Vgl. Martin; Albers et al. 2013

³⁸⁴ Vgl. S. 120

Die sieben Elemente des Vorgehens sind:

1. Situationsanalyse:

Analyse und Beurteilung der projektspezifischen Ausprägung von Zielen, Anforderungen, Nutzenprofil, ähnlichen (Vorgänger-)Produkten, Randbedingungen.

2. Problemeingrenzung:

Auswertung mittels logischer Zusammenhänge, generischer und adaptiver Erfahrungsmodelle, adaptiver Gewichtungen.

3. Alternative Lösungen:

Ableitung möglicher Betrachtungsräume aus einer differenzierten Interpretation der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße bezogen auf Basismotive und Gesamtmotivation (ggf. Ableitung von Ressourcenplanung, Wertschöpfungspotenzial, u.ä.).

4. Lösungsauswahl:

Identifikation relevanter Betrachtungsräume (zeitlicher und räumlicher Systemgrenzen) sowie darauf basierende Identifikation und Auswahl wesentlicher und energetisch relevanter Nutzenmerkmale.

5. Tragweitenanalyse:

Ableitung und Gewichtung sich daraus ergebender geeigneter Parameter und eines operationalen Bezugsmerkmals sowie Beurteilung der Chancen und Risiken, die sich aus der Festlegung auf einen Betrachtungsraum und entsprechende Randbedingungen ergeben.

6. Entscheidung und Umsetzung:

Definition von Nutzenfunktionen über Parameterausprägung und Aggregation zum Utility-based Energy Efficiency Indicator und Zielfestlegung ggf. mit abschließender Sensitivitätsanalyse.

7. Nachbereiten und Lernen:

Dokumentation aller Anpassungen, der „Lessons learned“ sowie des Anwendungsmodells im iPeM. Erweiterung und Ergänzung des adaptiven Teils der Methode basierend auf den projektspezifischen Erfahrungen.

Eine schematische Übersicht zu dem Vorgehen mit der Zuordnung der einzelnen Problemlösungsaktivitäten nach SPALTEN ist zusätzlich in Abbildung 47 dargestellt.

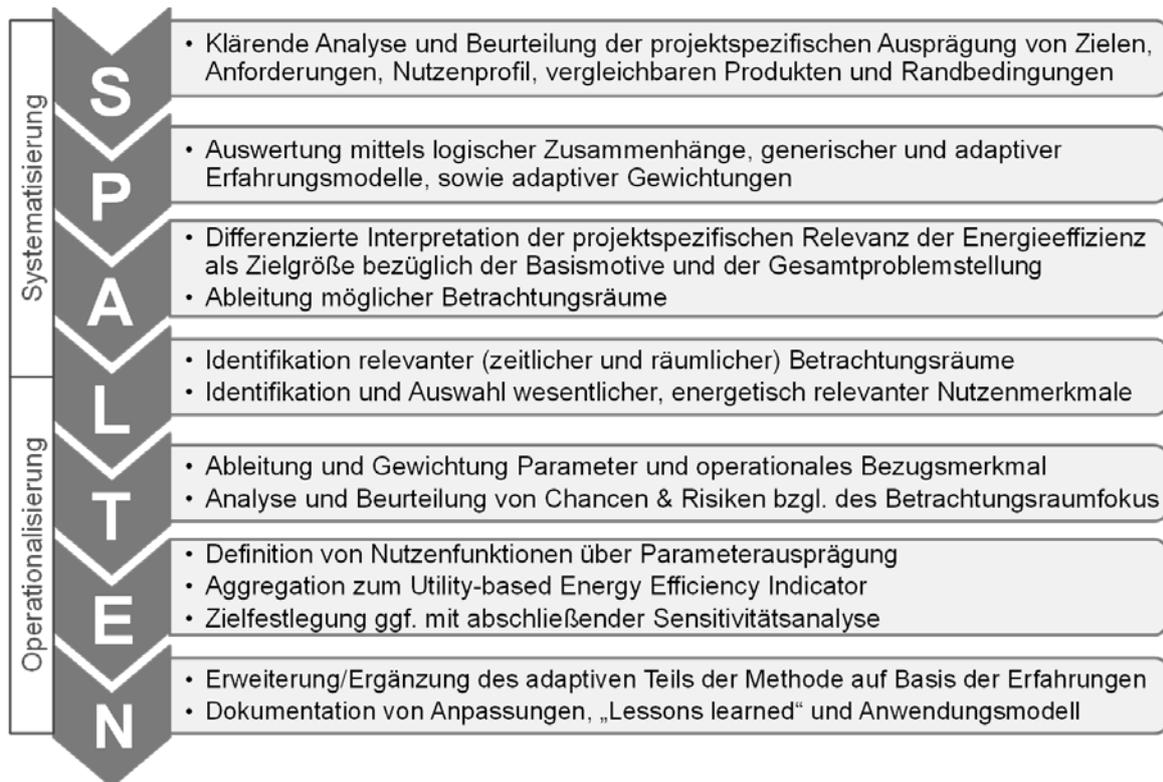


Abbildung 47: Schematische Darstellung des entwickelten Vorgehensmodells nach SPALTEN.³⁸⁵

Das vorgestellte Vorgehen fasst die wesentlichen Aktivitäten des Design to Energy Efficiency zusammen, bezüglich welcher im Rahmen der empirischen Untersuchung ein über den Stand der Forschung hinausgehender Bedarf an Unterstützung des Produktentwicklers identifiziert wurde. Es bildet damit ein Element des Handlungssystems, welches im integrierten Produktentstehungsmodell einzelnen Problemlösungsaktivitäten im Sinne ihres fraktalen Charakters zugeordnet werden kann. Dabei eignet sich die Methode primär, wie in Abbildung 48 dargestellt, zum Einsatz in Situationsanalyse und Problemeingrenzung während der Profillfindung sowie in damit verbundenen Aktivitäten, wie beispielsweise der Validierung, der Ideenfindung oder der Nutzungsanalyse (siehe auch Abbildung 49). Weiterhin ist auch ein Einsatz bei der Entwicklung oder Auswahl einer geeigneten Produktionsumsetzung – entsprechend des dabei ebenfalls zu klärenden Einflusses der Energieeffizienz – als Zielgröße sinnvoll.

Durch entsprechende Verknüpfungen im iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (vgl. Abbildung 48) kann die Unterstützung auf diese Weise situationsgerecht zur

³⁸⁵ Basierend auf Darstellungen aus Martin; Albers et al. 2013, S.6 und Albers; Martin et al. 2014, S.7

Verfügung gestellt und durch Anpassung und kontinuierliche Ergänzung in den Problemlösungsaktivitäten des Nachbereitens und Lernens erweitert werden.

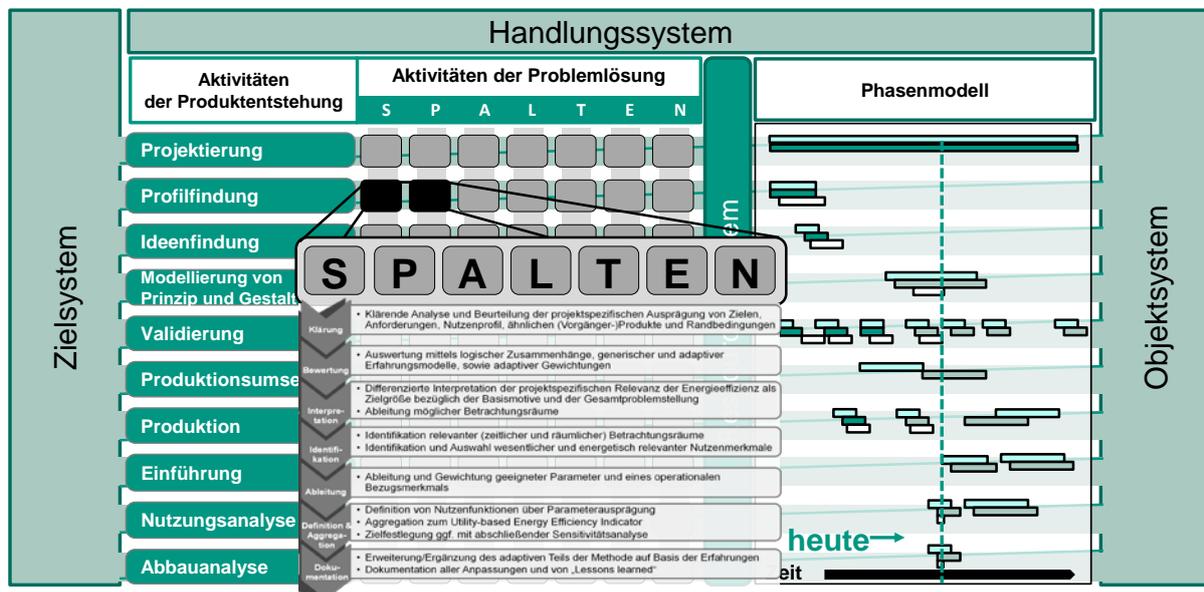


Abbildung 48: Einordnung der entwickelten Methode in Form eines SPALTEN-Prozesses zu den unterstützenden Problemlösungsaktivitäten (schwarz) der Profilfindung.

Die detaillierten inhaltlichen Elemente des entwickelten methodischen Vorgehens und ihrer wesentlichen Zusammenhänge werden in den vorangegangenen Kapiteln (Kapitel 6 und 7) ausführlich behandelt.

8.2 Referenzmodell

Referenzmodelle beschreiben Empfehlungen für den zeitlichen und inhaltlichen Ablauf von Prozessen im integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM). Die Referenzmodellierung baut nach MEBOLDT³⁸⁶ auf dem Metamodell des iPeM auf, hat dabei jedoch einen konkreten Bezug zu einer bestimmten Anwendung. Referenzmodelle geben durch die Abfolge von einzelnen Handlungsschritten, geeigneten Methoden und Werkzeugen sowie durch Bezug zu Objektsystemelementen konkrete Abläufe vor. Referenzprozesse basieren auf Erfahrungen und dienen als Bausteine zur Modellierung und Planung von projektspezifischen Produktentstehungsprozessen.

³⁸⁶ Meboldt 2008, S.205

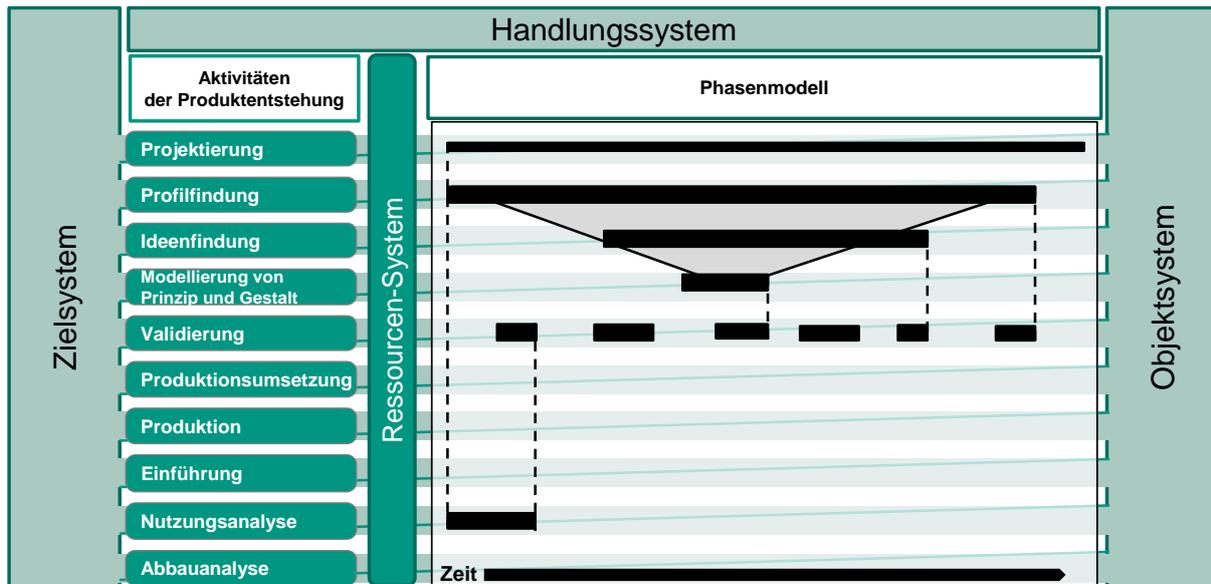


Abbildung 49: Referenzmodell für die Profildefinition im Kontext des DtEE.

Für die Profildefinition im Kontext des Design to Energy Efficiency wird ein Referenzmodell vorgeschlagen, welches die Abfolge der hierfür auszuführenden Aktivitäten der Produktentstehung beschreibt (Abbildung 49 und Abbildung 50). Die Form eines Dreiecks (Abbildung 49, grau hinterlegt) ist dabei charakteristisch für eine temporäre Konkretisierung zur Schaffung einer fundierten Entscheidungsbasis sowie eines validen Produktprofils mit ausreichendem Reifegrad. Die Konkretisierung findet in diesem Fall bis auf die Ebene der Modellierung von Prinzip und Gestalt statt, sodass mögliche Profile vor ihrer Auswahl entsprechend bewertet werden können.

Eingangs werden produktbezogene Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten³⁸⁷ im Rahmen einer Nutzungsanalyse erfasst und durch Validierungsaktivitäten abgesichert. Die Nutzungsanalyse bildet die Basis für Bewertungen und Entscheidungen bei der analytischen Betrachtung der Energieeffizienzziele und dem zu entwickelnden Produktprofil. Im weiteren Verlauf der Profilfindung werden zwischenzeitlich zusätzlich Aktivitäten der Ideenfindung durchgeführt um einen höheren Reifegrad bei der Profilentwicklung zu ermöglichen. In gleicher Weise werden gegebenenfalls Aktivitäten der Modellierung von Prinzip und Gestalt durchgeführt um die entwickelten Ideen und somit auch die erarbeiteten Profile in ihrem Reifegrad zu fördern. Auch diese Aktivitäten bzw. die dabei erarbeiteten Ergebnisse sind im Sinne einer kontinuierlichen Validierung abzusichern. Dieser gesamte Verlauf ist in Abbildung 49 schematisch im Phasenmodell des integrierten Produktentstehungsmodells dargestellt.

³⁸⁷ Häufig im Sinne einer Produktgenerationenentwicklung

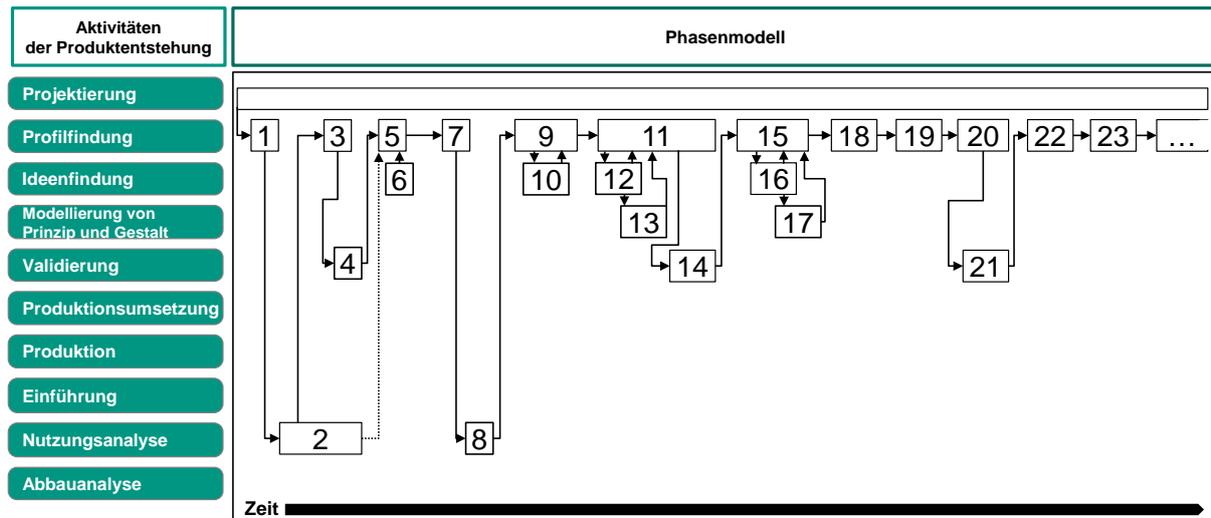


Abbildung 50: Referenzmodell für das entwickelte Vorgehen in Situationsanalyse und Problemeingrenzung der Profilfindung.

Zusätzlich zu einem schematischen Referenzmodell einer Profildeinition im Kontext des DtEE, wie es in Abbildung 49 dargestellt ist, wird ein konkretes Referenzmodell für das vorgestellte Vorgehensmodell (Abschnitt 8.1) zur Anwendung in Situationsanalyse und Problemeingrenzung der Profilfindung mit besonderer Berücksichtigung der Zielgröße Energieeffizienz vorgeschlagen (Abbildung 50). Dieses Referenzmodell basiert auf der zeitlichen Umsetzung von generischen Bausteinen des SPALTEN-Ansatzes und bietet daher trotz des prinzipiell sequenziellen Ablaufs die Möglichkeit erforderliche iterative Wiederholungen abzubilden. Die zeitliche Abbildung der einzelnen empfohlenen Aktivitäten ist dabei nur bezüglich ihrer Reihenfolge, nicht jedoch bezüglich der einzelnen Aktivitätendauern zu verstehen. Mögliche und wahrscheinliche Iterationen sind zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit in Abbildung 50 nicht dargestellt, da diese grundsätzlich vielfältig und insbesondere projektspezifisch sind.

Die einzelnen in Abbildung 50 dargestellten Elemente werden im Folgenden in Tabelle 9 erläutert:

Tabelle 9: Legende mit Beschreibung der einzelnen Bestandteile des Referenzmodells aus Abbildung 50 sowie zugeordneten Problemlösungsaktivitäten (PLA)

Schritt	PLA	Beschreibung
1	SA	Analyse von Zielen, Anforderungen, Nutzenprofil, Randbedingungen
2		Analyse Vorgängerprodukte
3		Beurteilung projektspezifischer Ausprägungen (Softwaretool)
4		Validierung Ergebnisse Situationsanalyse
5	PE	Auswertung der Relevanzbeurteilungen (Softwaretool) unter Anpassung der adaptiven Inhalte. Ggf auf Basis von Erfahrungsbasierten Modellen
6		Konzeptionelle Konkretisierung des Lösungsraums für fundierte Relevanzbeurteilung
7	AL	Interpretation von projektspezifischer Relevanz, Relevanzverteilung (Softwaretool) und Wertschöpfungspotenzial
8		Ggf. Erweiterung/Abgleich von geeigneten Betrachtungsräumen/Systemgrenzen abhängig von Relevanz(-verteilung) und des Wertschöpfungspotenzials
9		Ableitung möglicher geeigneter Betrachtungsräume (Softwaretool)
10		Konkretisierung zur Suche möglicher relevanter Betrachtungsräume
11	LA	Identifikation und Auswahl relevanter Betrachtungsräume und wesentlicher energetisch relevanter Nutzenmerkmale
12		Konkretisierung auf Ideenebene für fundierte Auswahl geeigneter Systemgrenzen
13		Konkretisierung auf Gestaltebene für eine fundierte Auswahl geeigneter Systemgrenzen
14		Validierung der Ergebnisse der Lösungsauswahl
15	TA	Analyse von abzuleitenden geeigneten Parametern und ihrer Gewichtung
16		Konkretisierung auf Ideenebene für die Analyse geeigneter Parameter zur Nutzenbeschreibung
17		Konkretisierung auf Prinzip- und Gestaltebene für die Analyse geeigneter Parameter zur Nutzenbeschreibung
18	EU	Definition von Nutzenfunktionen basierend auf LA und TA
19		Umsetzung des UBEEI mittels Aggregation der in LA ausgewählten Nutzenmerkmale
20		Festlegung der UBEEI-Zielwerte
21		Überprüfung der Zielwerte auf Plausibilität bzgl. Zielverständnis mittels Sensitivitätsanalyse
22	NL	Erweiterung/Ergänzung des adaptiven Teils der Methode basierend auf den projektspezifischen Erfahrungen
23		Dokumentation von Erfahrungen, Anpassungen und Anwendungsmodell

9 Werkzeugumsetzung und Validierung

Die ersten – analytisch geprägten – Elemente des entwickelten Vorgehensansatzes (*Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen* und *Lösungsauswahl*, Vgl. Abbildung 47) sind von hoher Komplexität und Abstraktion und beinhalten die Einbeziehung gespeicherten Wissens³⁸⁸ bzw. Erfahrung³⁸⁹. Daher bedürfen insbesondere diese Elemente einer Implementierung in Form eines Werkzeugs, um einen Mehrwert im praktischen Entwicklungsumfeld zu ermöglichen und diesen durch die kontinuierliche Erweiterung um projektspezifische Erfahrungen fortwährend steigern zu können. Die Operationalisierung im Rahmen der *Tragweitenanalyse* und der *Entscheidung und Umsetzung* (Abbildung 47) zeigt einen deutlich geringeren Anteil generischer Elemente, die in einem Werkzeug implementiert werden könnten. Daher findet eine Werkzeugumsetzung nur für den Systematisierungsteil statt.

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, muss ein solches Werkzeug die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Anleitung bei der Identifikation der dem Ziel zugrunde liegenden Motive in ihrer jeweiligen Ausprägung sowie der Ausprägungszusammensetzung
- Anleitung zur Klärung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Entwicklungsziel
- Ausgabe von Hinweisen und Empfehlungen bzgl. zu berücksichtigender oder zu fokussierender
 - Systemgrenzen
 - Produktentstehungsaktivitäten
 - Nutzenmerkmale
 - Weiterführender problemspezifischer methodischer Unterstützung aus dem Stand der Forschung

Darauf aufbauend werden in Abschnitt 6.2.2 bereits einige wesentliche Eigenschaften einer werkzeugseitigen Lösung zur Umsetzung des methodischen Ansatzes diskutiert. So sollen die Relevanzausprägungen der einzelnen Motive indirekt über

³⁸⁸ Nach Schmalenbach 2013 ist die in der Produktentwicklung am häufigsten anzutreffende Beschreibung von Wissen die vernetzte Information, die in die Lage versetzt, Vergleiche anzustellen, Verknüpfungen herzustellen und Entscheidungen zu treffen. Information steht dabei für strukturierte Daten, welche wiederum auf objektiven Fakten beruhen.

³⁸⁹ Die Erfahrung kann nach Schmalenbach 2013 neben dem impliziten Wissen auch tazites Wissen beinhalten.

die Abfrage von Zielen, Anforderungen und antizipierten Produkteigenschaften erfasst werden. Die Abfrage erfolgt mittels eines interaktiven Fragebogens. Durch die Beantwortung von mehreren sequenziellen Reihen von Fragen werden die wesentlichen Aspekte der jeweiligen motivspezifischen Relevanz beurteilt. Um für den Entwickler als Anwender die Komplexität zu begrenzen, behandelt und beurteilt er die Relevanz jeweils zu konkreten Anforderungen oder Produkteigenschaften aus einer beschränkten motivspezifischen Perspektive.

Die Empfehlung bezüglich der Reihenfolge der zu behandelnden Motivblöcke wurde wie folgt festgelegt (vgl. 6.2.2):

1. Mobilität
2. Übrige technisch / funktionale Aspekte
3. Betriebskosten / Förderungen
4. Gesetze
5. Außendarstellung
6. Ergonomie
7. Ökologie

Da der Fragebogen interaktiven Charakter haben soll, hängt die Fragesequenz immer auch von den zuvor gegebenen Antworten ab. Der schematische Ablauf einer Fragesequenz ergibt sich aus den Fragen, etwaigen Antwortoptionen, den damit verknüpften direkten (bzgl. des behandelten Motivs) oder indirekten Bewertungen (bzgl. anderer Motive oder Wechselwirkungen) sowie den Verknüpfungen mit Folgefragen. Dies wurde bereits in Abbildung 36 schematisch dargestellt.

Das Werkzeug ist so aufgebaut, dass es neben der Änderung von Bewertungen und Gewichtungen eine Anpassung, Erweiterung oder Ersetzung einzelner Fragen sowie dazugehöriger Antwortoptionen ermöglicht, was den Forderungen nach unternehmens- oder projektspezifischer Adaptierbarkeit Rechnung trägt. Dabei ist insbesondere eine produktspezifische Ergänzung von qualitativen Antwortoptionen (z.B. kurz / mittel / lang) um quantitative Wertebereiche hilfreich. Werden ganze Fragesequenzen ersetzt oder gestrichen, so ist der generische Teil der Methode betroffen und der gesamte vorgehensmethodische Ansatz ist hinsichtlich seiner Konsistenz zu hinterfragen und gegebenenfalls neu zu entwickeln.

Um die Hemmnisse einer Akzeptanz in der praktischen Anwendung so gering wie möglich zu halten, wird das prototypische Werkzeug zu Validierungszwecken in dem im industriellen Entwicklungsalltag gebräuchlichen Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel realisiert.

Es werden sowohl die Fragen, als auch die jeweiligen Antwortoptionen hinterlegt und mit den im Falle einer Auswahl zu belegenden Bewertungen verknüpft, wie es in

Abbildung 52 dargestellt ist. Weiterhin sind Übersichten verfügbar, welche beispielsweise die Einstellungsmöglichkeiten bzgl. der Gewichtungs- und Bewertungsvoreinstellungen (Abbildung 52), oder auch der Wechselwirkungsmatrix (Abbildung 53) beinhalten.

In diesem Tab können Einstellungen vorgenommen werden zu: Bewertung, Gewichtung, Frage, Antwort			
		Mobilität	Ökologie
1 Soll das Produkt durch einen mobilen Speicher mit Energie versorgt werden?	Ja	1	
	Nein		
1.1 Wie lange/weit soll der Energiespeicher halten?	Kurz	0	
	Mittel	2	
	Lang	3	
1.1.1 Soll es möglich sein, den Energiespeicher zu füllen/aufzuladen oder auszutauschen?	Füllen/Aufladen	3	
	Tauschen	1	2
	Beides	2	1
	Nein	0	

Abbildung 51: Ausschnitt der Ansicht „Einstellungen“ zur Anpassung von Bewertung, Gewichtung, Fragen und Antworten.

Bei der Bewertung von Wechselwirkungen werden jene Zusammenhänge relevanzverstärkend miteinbezogen, die durch Kombination unterschiedlicher Ausprägungen entstehen. Wird beispielsweise die Lebensdauer des zu entwickelnden Produkts durch die im Speicher verfügbare Energiemenge bestimmt und hat das Gewicht des Gesamtsystems einen hohen Einfluss auf seinen Energiebedarf (Abbildung 53), so erfolgt eine Verstärkung der Relevanz bezüglich des Mobilitätsmotivs um 10% (voreingestellter, kontextspezifisch anzupassender Defaultwert), da es einen sich gegenseitig verstärkenden Effekt aufweist.

Identifikation und Bewertung von Wechselwirkungen sind zwei der wesentlichen Elemente, welche unternehmens- oder produktkategoriespezifisch ergänzt und verfeinert werden sollten. Sie stellen eine wesentliche Unterstützung für den Entwickler dar, indem sie die gegebenenfalls hohe Komplexität der zugrunde liegenden Wechselwirkungen (durch die Höhe der Anzahl und des Wechselwirkungsgrades) auslagern und sich kontinuierlich speichern und erweitern lassen.

Visualisierung der Korrelationen zwischen den Fragen		1.1.1.1.1 Wie gut ist die Infrastruktur (Stromnetz zum Laden, Tankstellen, etc.) am Einsatzort ausgebaut?			1.2 Wie viel Einfluss wird das Gewicht des Produkts auf dessen Energiebedarf haben?			
		Schlecht	Mittel	Gut	Hoch	Mittel	Gering	Keiner
1.1.1.2 Wie hoch darf der Aufwand für den Transport zusätzlicher Energiespeicher sein?	Hoch							
	Mittel							
	Niedrig							
1.1.1.3 Wird die Lebensdauer des Produktes durch die zur Verfügung stehende Energiemenge	Ja				X	X		
	Nein							

Abbildung 52: Ausschnitt der Ansicht zur Definition von Wechselwirkungen und deren Bewertungen. Die betroffenen Elemente eines markierten Eintrags werden automatisch farblich hervorgehoben.³⁹⁰

Die Bedieneransicht (Abbildung 54) liefert zu Beginn der Anwendung einen Überblick über die jeweiligen Eingangsfragen der unterschiedlichen Fragesequenzen, wobei die jeweils aktive Frage farblich hervorgehoben wird. Am oberen Bildrand liefern zwei Diagramme die online-Auswertung bezüglich der motivspezifischen Relevanz (Abbildung 54, Säulendiagramm, links) sowie der projektspezifischen Gesamtrelevanz der Energieeffizienz als Zielgröße mit einer Aufteilung nach den Motiven (Abbildung 54, Kreisdiagramm, rechts). Eine beispielhafte Entwicklung der online-Auswertung ist in Abbildung 55 dargestellt. Neben den Antwortoptionen werden zu einigen Fragen zusätzliche Informationen bereitgestellt, die entweder nähere Angaben zum Verständnis der Frage liefern, oder aber Verknüpfungen zu online verfügbaren Hilfestellungen zur Beantwortung der Frage. So wird dort beispielsweise auf Datenbanken zu verfügbaren Förderungen, Energieeffizienzlabels oder Ansätze zur Beurteilung der ergonomischen Belastung³⁹¹ verwiesen.

³⁹⁰ Die dargestellte Werkzeugvariante wurde von HaCam 2014 (betreute Abschlussarbeit) erstellt.

³⁹¹ Beispielsweise LMM MA (Leitmerkalmethode Manuelle Arbeitsprozesse), IAD-BkA (Institut für Arbeitswissenschaft TU Darmstadt - Bewertung körperlicher Arbeit) oder HARM (Hand Arm Risk Assessment Method)

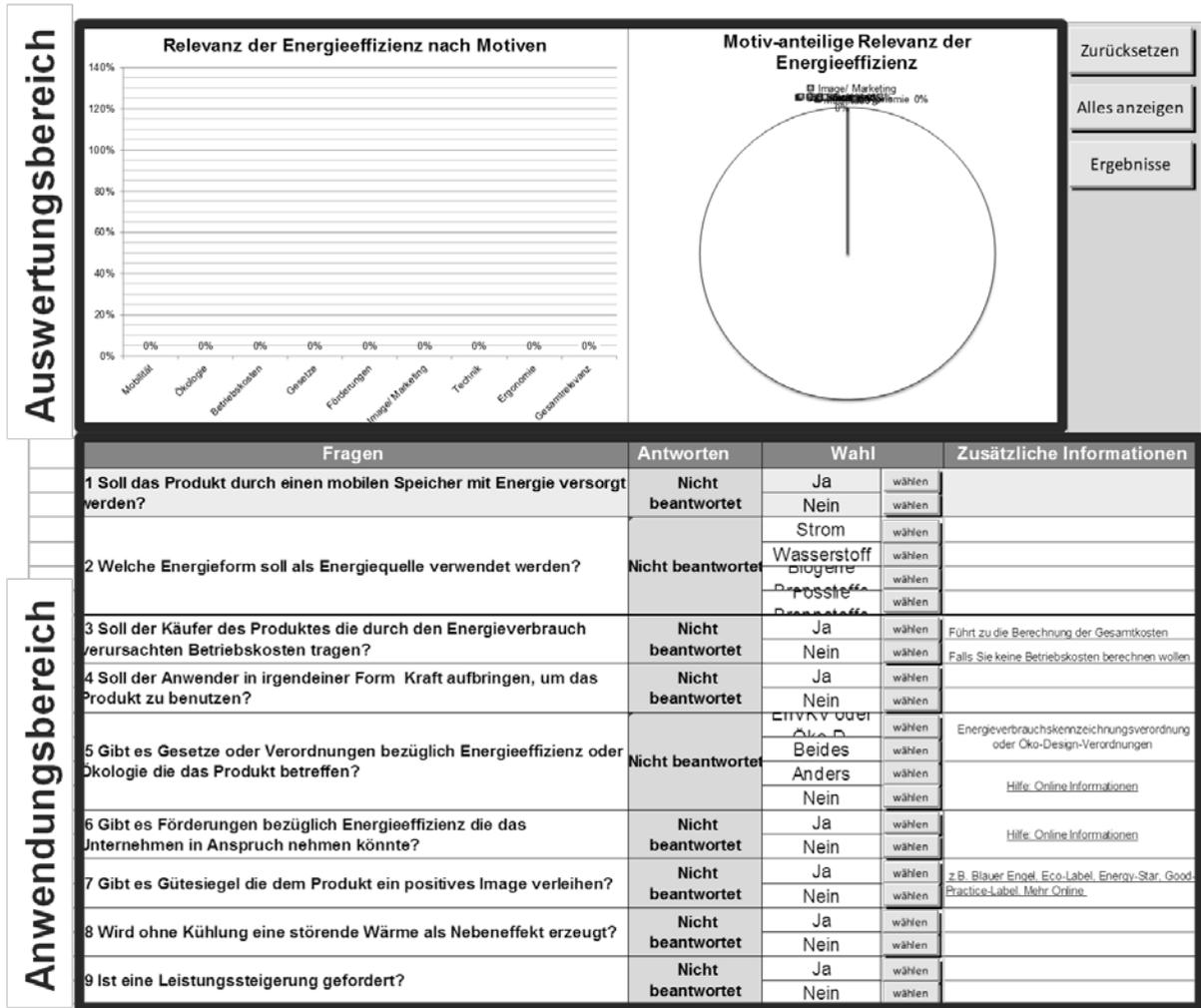


Abbildung 53: Initiale Bedieneransicht mit Auswertungsbereich (Diagramme) oben und Anwendungsbereich (Fragen und Antworten) unten.

Bei Beantwortung einer Sequenzeingangsfrage werden in Abhängigkeit von der Antwort die weiterführenden Fragen zu diesem Motivkomplex eingeblendet. Dies ist beispielhaft für den Motivbereich Mobilität in Abbildung 55 dargestellt.

Zurücksetzen
Alles anzeigen
Ergebnisse

Relevanz der Energieeffizienz nach Motiven

Motiv	Relevanz (%)
Mobilität	120%
Ökologie	25%
Betriebskosten	92%
Gesetze	100%
Forderungen	0%
Image/Marketing	13%
Technik	0%
Ergonomie	73%
Gesamtrelevanz	70%

Motiv-anteilige Relevanz der Energieeffizienz

Motiv	Anteil (%)
Mobilität	23%
Ökologie	2%
Betriebskosten	15%
Gesetze	17%
Ergonomie	10%
Image/Marketing	3%
Forderungen	0%

Fragen

3 Soll der Käufer des Produktes die durch den Energieverbrauch verursachten Betriebskosten tragen?

3.1 Wie hoch soll der Anschaffungspreis sein?

4 Soll der Anwender in irgendeiner Form Kraft aufbringen, um das Produkt zu benutzen?

4.1 Wie viel Einfluss wird das Gewicht des Produktes auf den Energiebedarf des Anwenders haben?

4.1.1 Wie hoch wird die physische Belastung des Anwenders sein?

5 Gibt es Gesetze oder Verordnungen bezüglich Energieeffizienz oder Ökologie die das Produkt betreffen?

Antworten

Ja

50 €

Ja

Hoch

Erhöht

Beides

Wahl

Ja
Nein

Preis Links eingeben

Ja
Nein

Hoch
Mittel
Gering
Keinen

Hoch
Erhöht
Mittel
Gering

Beides
Anders
Nein

Zusätzliche Informationen

Führt zu die Berechnung der Gesamtkosten
Falls Sie keine Betriebskosten berechnen wollen

Preis eingeben und dann bestätigen

Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung oder Öko-Design-Verordnungen

Hilfe: [Online-Informationen](#)

Auswertungsbereich

Anwendungsbereich

Abbildung 54: Ausschnitt der Bedieneransicht während der Anwendung mit Auswertungsbereich (Diagramme) oben und Anwendungsbereich (Fragen und Antworten) unten.

Sieht das Produktprofil vor, dass der Produkthanwender die energetischen Betriebskosten zu tragen hat, so öffnet sich ein Dialogfenster, in welchem die zur Kalkulation notwendigen Angaben in Abhängigkeit der zuvor erfassten Informationen

abgefragt werden (vgl. Abbildung 56). Grundlage zur Beurteilung der Energieeffizienzrelevanz aus Sicht der Betriebskosten sind die relativen Betriebskosten, welche sich aus dem Verhältnis von Betriebskosten zu Anschaffungskosten ergeben (vgl. Gl. 6.1). Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit des Informationsstands in zwei unterschiedlichen Detaillierungsstufen. Die schnelle Grobkalkulation erfolgt durch die Angabe von einfachen (Mittel-) Werten über die voraussichtliche dauerhafte Leistungsaufnahme, die angestrebte Produktlebensdauer sowie die Energiekosten, jeweils in Abhängigkeit der zuvor gegebenen Antworten (beispielsweise bzgl. der Verwendung eines Energiespeichers). Über die Schaltfläche „Defaultwerte“ können hinterlegte Standardwerte, insbesondere für die anfallenden Energiekosten je nach zuvor gewählter Energieform eingetragen werden.

Grau = Vom Anwender zu ergänzen	Zurücksetzen	
Abschnitt B		
Abgabeleistung des Ladegerätes: P _{abL} [W]	0	
Wirkungsgrad des Ladegerätes: η [%]	0%	
Ladedauer: T _{Lade} [h]	0	
Durchschnittliche Leistungsaufnahme des Produkts P _Ø [W]	0	Hilfe ->
Akkuspannung: U [V]	0	
Akkukapazität: Q [Ah]	0	
Lebensdauer des Produktes: T _{leben} [h]	0	
Stromkosten: K _{Strom} [€/kWh]	0,29	
Anzahl Ladezyklen nachdem der Akku ausgetauscht werden muss: y	0	
Kosten eines Speichers für den Kunden: K _{Speicher} [€]	0 €	
Gesamtkosten: K _{Betrieb} [€]	0 €	
Default Werte	Bestätigen	

Abbildung 55: Ausschnitt der Ansicht zur Berechnung der voraussichtlichen energetischen Betriebskosten. Hier dargestellt ist Abschnitt B, welcher für elektrisch betriebene wiederaufladbare mobile Produkte verwendet wird.

Über eine entsprechende Schaltfläche gelangt der Anwender bei Bedarf zur ausführlichen Berechnung der relativen Betriebskosten. Dort werden Angaben zu unterschiedlichen Betriebspunkten sowie deren zeitlichem Anteil an der Nutzungsdauer eingetragen um differenziertere Aussagen treffen zu können. In den fokussierten Aktivitäten Profildung kann eine Verfügbarkeit solcher detaillierter Angaben jedoch nicht vorausgesetzt werden.

Bei der in Abbildung 57 dargestellten Übersicht werden die in der beispielhaften Ausführung tatsächlich auftretenden Wechselwirkungen sowie die dadurch resultierende prozentuale Bewertungsveränderung des betroffenen Motivs zur besseren Nachvollziehbarkeit für den Benutzer farblich hervorgehoben.

Wechselwirkung				
Antwortkombination	Erklärung	Einfluss	Aktiv	Betroffene Motive
1 Ja + 1.2 Hoch + 2 Elektrisch	Bei Verwendung eines elektrischen Energiespeichers steigen die Kosten und das Gewicht für einen größeren oder leistungsfähigeren Energiespeicher: die Relevanz der Energieeffizienz steigt zusätzlich	8%	0%	Mobilität
1 Ja + 1.2 Mittel + 2 Elektrisch		5%	5%	
1.1.1.3 Ja + 1.2 Hoch	Wenn die Lebensdauer des Produktes durch die Energiemenge	10%	0%	

Abbildung 56: Ausschnitt der Übersicht zur Erklärung und Bewertung der Auswirkungen von Wechselwirkungen.

In einer abschließenden Ansicht wird die differenzierte Bewertung der Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße für die vorliegende Aufgabenstellung in unterschiedlichen Darstellungen aufbereitet. Dazu gehören auch die während der Bearbeitung sichtbaren Diagramme zur motivspezifischen Relevanz sowie der Gesamtrelevanz mit den einzelnen Motivanteilen. Im Säulendiagramm zur Abbildung der motivspezifischen Relevanz kann neben der jeweiligen Relevanzbewertung auch der Einfluss von Wechselwirkungsanteilen auf die jeweilige Relevanz abgelesen werden, um auf die entsprechenden Zusammenhänge aufmerksam zu machen und den Entwickler dahingehend zu sensibilisieren.

Bereits das Explizieren von üblicherweise bestenfalls implizit berücksichtigten Motiven und ihrer projektspezifischen Ausprägung für die Relevanzbeurteilung der Energieeffizienz und eine entsprechend differenzierte Priorisierung, stellt einen Mehrwert des Vorgehensansatzes dar. Es ermöglicht eine entsprechend differenzierte Berücksichtigung bei der Abschätzung von damit verknüpften Wertschöpfungspotenzialen³⁹² und der Ressourcenplanung in den Aktivitäten der Projektierung. Zusätzlich wird eine Liste mit Empfehlungen und Verweisen auf

³⁹² Vgl. Abschnitt 6.2.4

weiterführende Hilfestellungen präsentiert. Diese werden durch logische und erfahrungsbasierte Modelle begründet und basieren auf

- einzelnen Antworten
- Antwortkombinationen
- der Beurteilung der Gesamtrelevanz der Energieeffizienz
- der Verteilung der motivspezifischen Relevanzbeurteilungen

sowie auf Kombinationen der einzelnen Punkte ³⁹³ wie in Abschnitt 6.3 vorgestellt wurde.

Die Empfehlungen und weiterführenden Hinweise sind wesentlicher Bestandteil des adaptiven Teils der Methode bzw. des Werkzeugs und können insbesondere durch unternehmensspezifische Anpassung in der Aktivität „Nacharbeiten und Lernen“³⁹⁴ und kontinuierliche Pflege ihren gesamten Mehrwert entfalten. Die im initialen Werkzeugzustand bestehenden Empfehlungen bestehen primär aus

- Hinweisen bzgl. zu fokussierender Produktentstehungsaktivitäten oder Produktlebenszyklusabschnitten
- Hinweisen zur Wahl der Systemgrenzen bezüglich einer Berücksichtigung des Anwenders
- Verweisen auf geeignete methodische Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz im projektspezifischen Kontext

Die Empfehlungen bilden damit eine zentrale Grundlage zur Auswahl geeigneter Nutzenmerkmale für die Abbildung der Energieeffizienzziele im UBEEI (siehe Abschnitt 7.4).

Durch die Implementierung des Vorgehensmodells in einem Werkzeug wird eine Validierung des Ansatzes im praktischen Entwicklungskontext ermöglicht, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

9.1 Validierende Studien

In diesem Abschnitt soll das entwickelte Vorgehen durch seine Anwendung auf Entwicklungsaufgaben unterschiedlicher Art und Komplexität untersucht und validiert werden, um so den erreichten Stand darlegen und gegebenenfalls mögliche Verbesserungen ableiten zu können.

³⁹³ Vgl. Albers; Martin et al. 2014

³⁹⁴ Vgl. Tabelle 9, Schritt 22

Die Anwendungsbeispiele sind bewusst von signifikant unterschiedlichem Komplexitätsgrad, sodass insgesamt ein differenzierter Eindruck von Vor- und Nachteilen sowie von den Grenzen einer Anwendbarkeit gewonnen werden kann.

Bei der Studie zur Entwicklung energieeffizienter Hochstromsteckverbinder (9.1.1) liegt der Fokus auf der Untersuchung der prinzipiellen Anwendbarkeit des methodischen Vorgehens und der Validität der ermittelten Relevanz, ihrer Verteilung auf die verschiedenen Motive sowie der abgeleiteten Empfehlungen, bis hin zur Formulierung der Zielgröße durch den entwickelten Energieeffizienzindikator UBEEI. Eine softwareseitige Umsetzung des Vorgehens ist hierbei nicht gegeben und ist dementsprechend nicht Gegenstand der Untersuchung. Für eine angemessene Vergleichbarkeit wird jedoch das entwickelte Werkzeug retrospektiv auf dieses Projekt angewandt und die Ergebnisse dargestellt (vgl. Abbildung 58). Das Vorgehen selbst wurde während dem Projekt weiterentwickelt und an identifizierte Anforderungen angepasst.

Im Rahmen der Studie zur industriepraktischen Entwicklung eines energieeffizienten elektropneumatischen Schlagwerks (Abschnitt 9.1.2) steht die Validierung des Vorgehens im industriellen Entwicklungsumfeld im Vordergrund. Auf dieser Basis erfolgt eine erste Umsetzung des Ansatzes in einem softwarebasierten Werkzeug.

Die Studie im Rahmen der zwei Entwicklungsprojekte „energieeffizienter Winkelbohrkopf“ sowie „Akku-Bohrhammer“ (Abschnitt 9.1.3) fokussiert die empirische Untersuchung der industriepraktischen Anwendung von Methode und Werkzeug. Dies beinhaltet Interviews mit den Entwicklungsingenieuren, einen Vergleich individueller Anwender im gleichen Projektkontext sowie die Ableitung von praxisrelevanten Bedarfen und Einschränkungen.

Eine Anwendung des entwickelten interaktiven Werkzeugs zur Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße im Kontext einer Elektrofahrzeugentwicklung (Abschnitt 9.1.4) beleuchtet die Anwendung direkt während den unsicherheitsbehafteten Aktivitäten der Profildefinition.

9.1.1 Studie „Energieeffiziente Hochstromsteckverbinder“

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und Bestrebungen nach alltagstauglicher und individueller Elektromobilität, gewinnen Hochstromkontaktsysteme zunehmend an Bedeutung für die Gesamtsystementwicklung. Eine verlustarme und zuverlässige Übertragung möglichst hoher elektrischer Ströme sind die zentralen Ziele bei der Entwicklung dieser Systeme.

Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) geförderten Projekts, welches in einer Kooperation zwischen IPEK – Institut für Produktentwicklung und

ACA – Atlas Contacte GmbH durchgeführt wurde, war die Entwicklung eines innovativen energieeffizienten Hochstromkontaktsystems.³⁹⁵ Dabei wurde die Energieeffizienz zunächst auf einen hohen Wirkungsgrad sowie eine energieeffiziente Fertigung bezogen.

Ein bestehender Lösungsansatz für die Reduktion der Energieverluste in der Nutzung ist die Erhöhung der Kontaktkräfte. Hohe Kontaktkräfte führen nachweislich zu geringeren Kontaktwiderständen.³⁹⁶ Dieser Zusammenhang konnte bisher nur unzureichend für eine Verbesserung der Systeme genutzt werden, da mit steigender Kontaktkraft die vom Bediener aufzubringenden Betätigungskräfte (d. h. Steck- und Ziehkräfte) ebenfalls linear ansteigen.

Ausgehend von den gegebenen Projektzielen und Erfahrungen aus Vorgängerentwicklungen wird der interaktive Fragebogen zur systematischen Betrachtung der Zielgröße Energieeffizienz angewendet, um darauf aufbauend eine Zielgröße in Form des Utility-Based Energy Efficiency Indicators aufzustellen. Die Bewertung der ökonomischen Motive zur Berücksichtigung der Energieeffizienz erfolgt beispielsweise auf Basis von Erfahrungswerten aus Vorgängerprodukten sowie Anfragen über den Projektpartner: Es wird ein Kontaktwiderstand von $22\mu\text{Ohm}$, eine über 50% der Lebensdauer (zehn Jahre) anliegende Betriebsstromstärke von 600A sowie stark stückzahlabhängige Herstellungskosten von ca. 8€ (Anschaffungskosten ca. 10€) angenommen³⁹⁷. Die Stromkosten fallen im industriellen Umfeld an, weshalb mit Preisen von 0,12€/kWh gerechnet wird. Damit ergibt sich ein Betriebs- zu Anschaffungskosten-Verhältnis von ca. $KW_k=4$ nach Gl. 6.1 (S.107).

Darauf basierend wird die projektspezifische Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße sowie ihre Verteilung auf die gegebenen Motive mithilfe der Methode bewertet und mittels einer retrospektiver Werkzeuganwendung, wie in Abbildung 58 gezeigt, visualisiert. Die Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße für die vorliegende Entwicklungsaufgabe wird mit 71% bewertet. Dabei entfällt die höchste motivspezifische Relevanzbeurteilung auf die Betriebskosten (100%) und die technisch-funktionalen Aspekte (92%). Weiterhin wird die Energieeffizienzrelevanz aus Sicht ergonomischer (55%) Motive als nicht vernachlässigbar eingestuft. Dagegen kann das Ziel aus Sicht der Motivlage bezüglich und Mobilität, Gesetze oder finanzieller Förderungen vernachlässigt werden. Das außendarstellungsbezogene (29%) und das ökologische Motiv (25%) sind in einem Grenzbereich der

³⁹⁵ Vgl. Albers; Martin 2013

³⁹⁶ Vgl. Albers; Martin et al. 2011 und Albers; Martin 2013

³⁹⁷ Vgl. Atlas ACA, 2014

Relevanz. Mithilfe des Werkzeugs kann nachvollzogen werden, dass die Relevanzbewertung bzgl. der Ökologie maßgeblich auf der Angabe basiert, es werde für das zu entwickelnde System Downsizing angestrebt. Da eine Verknüpfung dieses Aspekts mit einer Relevanz der Energieeffizienz aus ökologischer Sicht bei dem vorliegenden System³⁹⁸ nicht nachvollzogen werden kann, wird auch das ökologische Motiv vernachlässigt.

Empfehlungen, die sich in dieser Anwendung aus der Methode ableiten lassen, sind

- Fokussierung der Produktnutzungsphase
- Einfluss des Anwenderverhaltens / der Betriebsstrategie auf die Energieeffizienz untersuchen und ggf. gezielt fördern
- Formulierung von Energieeffizienzzielen unter Berücksichtigung der Betriebskostenauswirkungen
- Betriebskosteneinsparungen und entsprechende Verkaufspreissteigerungen bei Potenzialbetrachtung berücksichtigen
- Ausnutzung / Berücksichtigung der Anwenderenergie für eine Energieeffizienzsteigerung unter Beachtung der ergonomischen Belastungsgrenzen nach den einschlägigen Richtlinien³⁹¹
- Energieeffizienzsteigerung evtl. über Masse/Bauraumfreiheit möglich?

Sowie der Verweis auf passende Methoden zur systematischen Steigerung der Energieeffizienz in der Nutzungsphase:

- Auswahl passender Guidelines nach RATH ET AL.³⁹⁹,
- Gestaltungsrichtlinien nach TELENKO UND SEEPERSAD⁴⁰⁰ und BONVOISIN ET AL.⁴⁰¹

³⁹⁸ Die Besonderheit des Hochstromsteckverbinders als „aktives“ Produkt (Vgl. Abschnitt 2.3.2) ist, dass es selbst nicht energetisch angetrieben wird, sondern nur durch seine passive Energieübertragung verlustbedingt Energie thermisch umsetzt.

³⁹⁹ Telenko und Seepersad 2010

⁴⁰⁰ Rath; Birkhofer et al. 2011a

⁴⁰¹ Bonvoisin; Mathieux et al. 2010 Rath; Birkhofer et al. 2011aRath; Birkhofer et al. 2011aRath; Birkhofer; Bohn 2011a

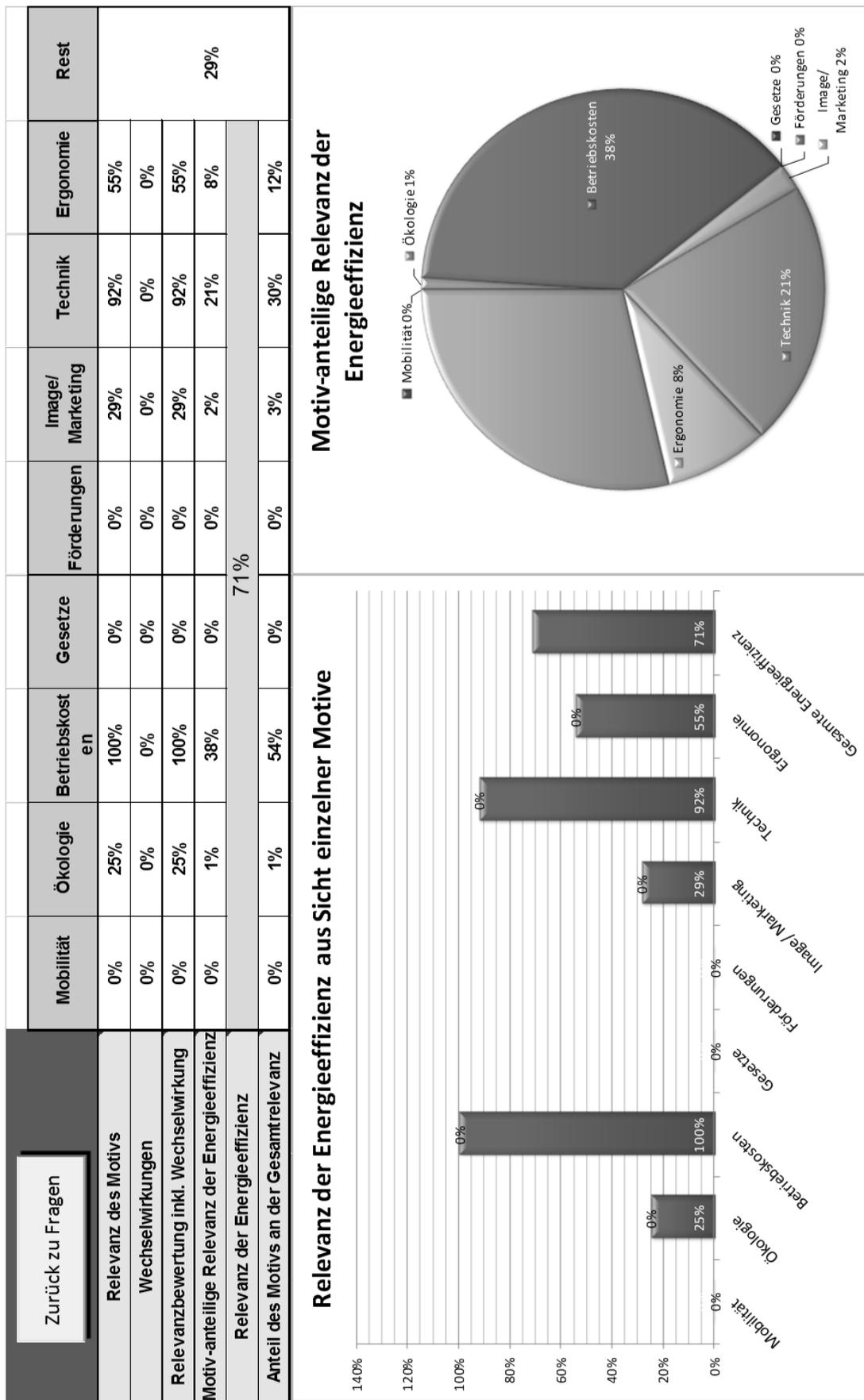


Abbildung 57: Ausschnitt der abschließenden Bilanz einer Untersuchung der differenzierten projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz.

Entsprechend der zu fokussierenden Aspekte werden die für die Zielsetzung zu berücksichtigenden parametrisierten Nutzenmerkmale ausgewählt und in Form des entwickelten Indikators (UBEEI) formuliert. Dies sind die maximal zulässige Betätigungskraft F_B , die maximale Stromtragfähigkeit I_{max} , die geforderte Anzahl von Steckzyklen $\#_S$ sowie die angestrebten geometrischen Maße zu Länge l und Durchmesser D . Als operationale Bezugsgröße dient die Betriebsstromstärke I . Die Berücksichtigung des Energieaufwands erfolgt bei dem Hochstromsteckverbinder, der zunächst selbst keinen intentionalen Energieumsatz betreibt, über die Quantifizierung der über die Zeit integrierten Verlustleistung P_V , welche sich aus der Multiplikation des Kontaktwiderstands mit der quadrierten Stromstärke ergeben. Die Nutzenmerkmale wurden gemäß den Wichtigkeitsverhältnissen durch intersubjektive Bewertungen im Projektteam gewichtet⁴⁰². Gemäß dem entwickelten Vorgehensmodell werden im Anschluss die Nutzenfunktionen definiert. Beispielhaft ist in Abbildung 59 die Nutzenverteilung über der Betätigungskraft aufgetragen. Die Stützpunkte, auf Basis welcher die Interpolation erfolgt, sind mit $F_B=10N$; $75N$; $120N$ erkennbar.

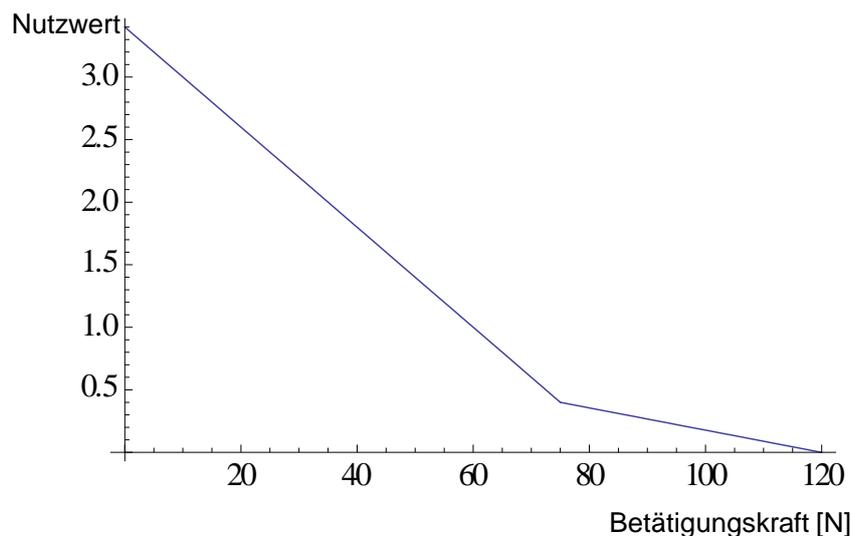


Abbildung 58: Exemplarische Nutzenfunktion über Betätigungskraft⁴⁰³

Für den stationären Betrieb kann die Energieeffizienzzielgröße somit durch

$$UBEEI = \frac{I}{\int P_V} * \frac{1}{12} * (2 f(F_B) + 5,5 f(I_{max}) + 3,5 f(\#_S) + 1 f(D, l)) \quad \text{Gl. 9.1}$$

beschrieben werden.

⁴⁰² Vgl. Ply 2013 (betreute Abschlussarbeit)

⁴⁰³ Aus Ply 2013 (betreute Abschlussarbeit)

Für eine Zielerfüllung mit $Nutzwert=1$, einem Betriebsstrom von $I=400$ und einer zulässigen Verlustleistung von $P_V=20\mu\Omega*(400A)^2=3,2W$ über eine durchgehende Betriebsdauer von $t=1a$ wird die entsprechende Zielgröße mit

$$\begin{aligned}
 UBEEI &= \\
 \frac{I}{\int P_V} * \frac{1}{12} * (2 f(F_B = 60N) + 5,5 f(I_{max} = 500A) + 3,5 f(\#_S = 500) \\
 &+ 1 f(D = 50mm, l = 70mm)) = \frac{400A}{\int 3,2W} \quad \text{Gl. 9.2} \\
 &= 14,3 \frac{A}{kWh}
 \end{aligned}$$

beschrieben. Dieser Zielwert bezüglich der Energieeffizienz kann nun auf unterschiedliche Weise erreicht oder übertroffen werden. So kann eine Verringerung der Verlustleistung ebenso zur Zielerreichung oder -übererfüllung beitragen, wie eine Verbesserung der Nutzenaspekte im Rahmen des ihnen zugeordneten Gewichts. Dies könnte durch eine Verringerung der Betätigungskraft oder einer Erhöhung der Stromtragfähigkeit erfolgen. Für ein anschauliches Verständnis der so ausgedrückten Verhältnisse kann zusätzlich der Kehrwert des UBEEI, in der Form

$$UBEEI^{-1} = \frac{28 kWh}{400A} \quad \text{Gl. 9.3}$$

gebildet werden. Nach Gl. 9.3 dürfen maximal $28kWh$ Energie eingesetzt werden, um einen Betriebsstrom von $I=400A$ über ein Jahr über den zu entwickelnden Steckverbinder fließen zu lassen.

Im Verlauf des Projekts wird ein innovativer Ansatz zur Kontaktkraftmaximierung bei nahezu gleichbleibender (werkzeugloser) Bedienkraft entwickelt, prototypisch umgesetzt und eingehend untersucht.⁴⁰⁴ Das Kontaktkraft- zu Bedienkraft-Verhältnis kann so um das achtfache gesteigert werden. Zusätzlich wird eine neuartige Kontaktgeometrie entwickelt, die eine Mehrfachkontaktierung mit einer den hohen Kontaktkräften (>900N) angemessenen Elastizität ermöglicht. Dadurch erfolgt eine Absenkung des Kontaktwiderstands um ca. 10%.

Zwischenfazit

Die explizite Berücksichtigung der Bedienkraft als ein Teil der Energieeffizienz des Steckverbinders führt zu einem umfassenderen und einheitlichen Verständnis der Energieeffizienz über den energetischen Wirkungsgrad hinaus. Eine entsprechende

⁴⁰⁴ Vgl. Albers; Martin 2013 und Albers; Martin et al. 2014

Zielgröße kann so angemessen differenziert quantifiziert werden. Dadurch kann die Entwicklung einer innovativen Lösung unterstützt werden, ein tatsächlich kausaler Zusammenhang von Zielformulierung und Lösungsfindung kann hierbei naturgemäß nicht nachgewiesen werden.

Die Verwendung des Werkzeugs zeigt zielführende Verweise und Empfehlungen und führt zu einer validen Verteilung der Energieeffizienzrelevanz. Einzig die Höhe der Relevanzbeurteilung aus Betriebskostenmotiven scheint überhöht, weshalb die zugrunde liegenden Kennwertmodelle hinterfragt werden und eine logarithmische anstelle der linearen Relevanzbewertung auf Basis des Betriebs- zu Anschaffungskosten-Verhältnisses eingeführt wird (vgl. 6.2.2).

9.1.2 Studie „Elektropneumatisches Schlagwerk eines Akku-Bohrhammers“

In Kooperation mit der Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH wird eine studentische Abschlussarbeit durchgeführt und durch den Autor betreut.⁴⁰⁵ Das konstruktive Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines effektivitäts- und effizienzoptimierten Schlagwerkkonzepts. Zur Veranschaulichung des Aufbaus eines elektropneumatischen Schlagwerks ist in Abbildung 60 ein Teilschnitt eines Meißelhammer-Schlagwerks dargestellt.



Abbildung 59: Elektropneumatisches Schlagwerk in der Teilschnittdarstellung einer Hilti TE-1000⁴⁰⁶

⁴⁰⁵ Geiger 2013 (betreute Abschlussarbeit)

⁴⁰⁶ Quelle: online unter <http://www.protoolreviews.com/news/how-it-work-rotary-hammers/5969/>

Es wird ein Fragenkatalog zur Umsetzung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode entworfen.⁴⁰⁷ Die Methode wird hierfür auf drei unterschiedlichen Ebenen implementiert (Abbildung 61). Zunächst wird das Vorgehen in tabellarischer Form dargestellt, welche das vollständige Set an Fragen, die identifizierten Wechselwirkungen, die erläuternden Kommentare sowie die aus den Antworten resultierenden Empfehlungen und Hinweise umfasst. Die zweite Ebene ist eine grafische Repräsentation, ähnlich eines Ablaufdiagramms, welche die strukturellen Zusammenhänge der Klassifikation des interaktiven Fragebogens sowie die dokumentierten Wechselwirkungen enthält. Die dritte Ebene besteht aus der grafischen Anwenderschnittstelle und einer Implementierung der Methode in praktisch anwendbarer Form.⁴⁰⁷ Bei dieser (Zwischen-) Version des Werkzeugs erscheinen die Fragen nacheinander innerhalb eines Fragenabschnitts in Abhängigkeit der zuvor gegebenen Antworten. Die erläuternden Kommentare werden für die aktuelle Frage sowie durch eine Mouseover-Funktion zu den einzelnen Antwortoptionen angezeigt. Die Wechselwirkungen sind für den Anwender nicht sichtbar und werden nur dann abschließend aufgezeigt, falls sie durch die Beantwortung als relevant identifiziert werden.

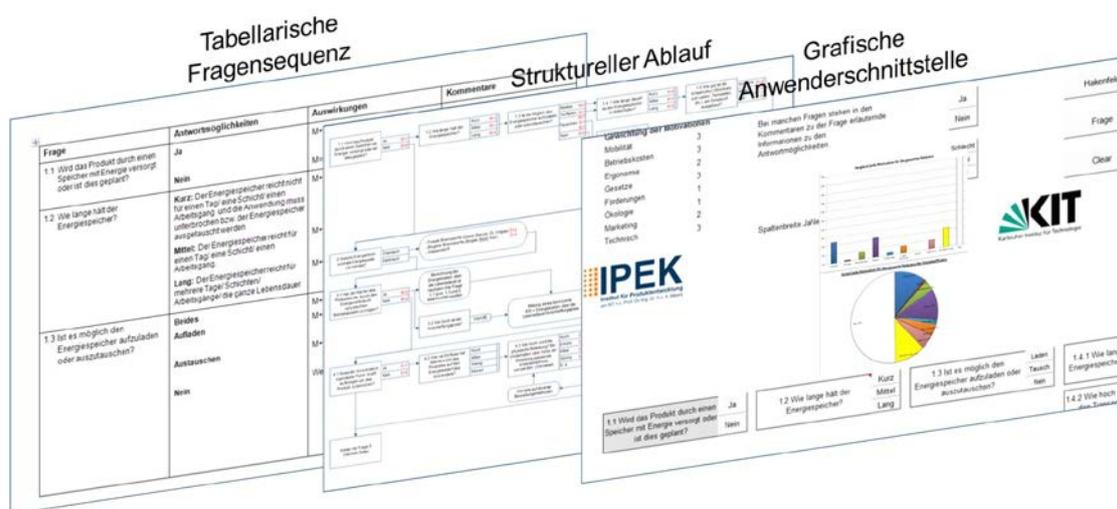


Abbildung 60: Schematische Darstellung der drei Ebenen zur Umsetzung der Methode.⁴⁰⁸

⁴⁰⁷ Vgl. Albers; Martin et al. 2014

⁴⁰⁸ Nach Albers; Martin et al. 2014, S.8

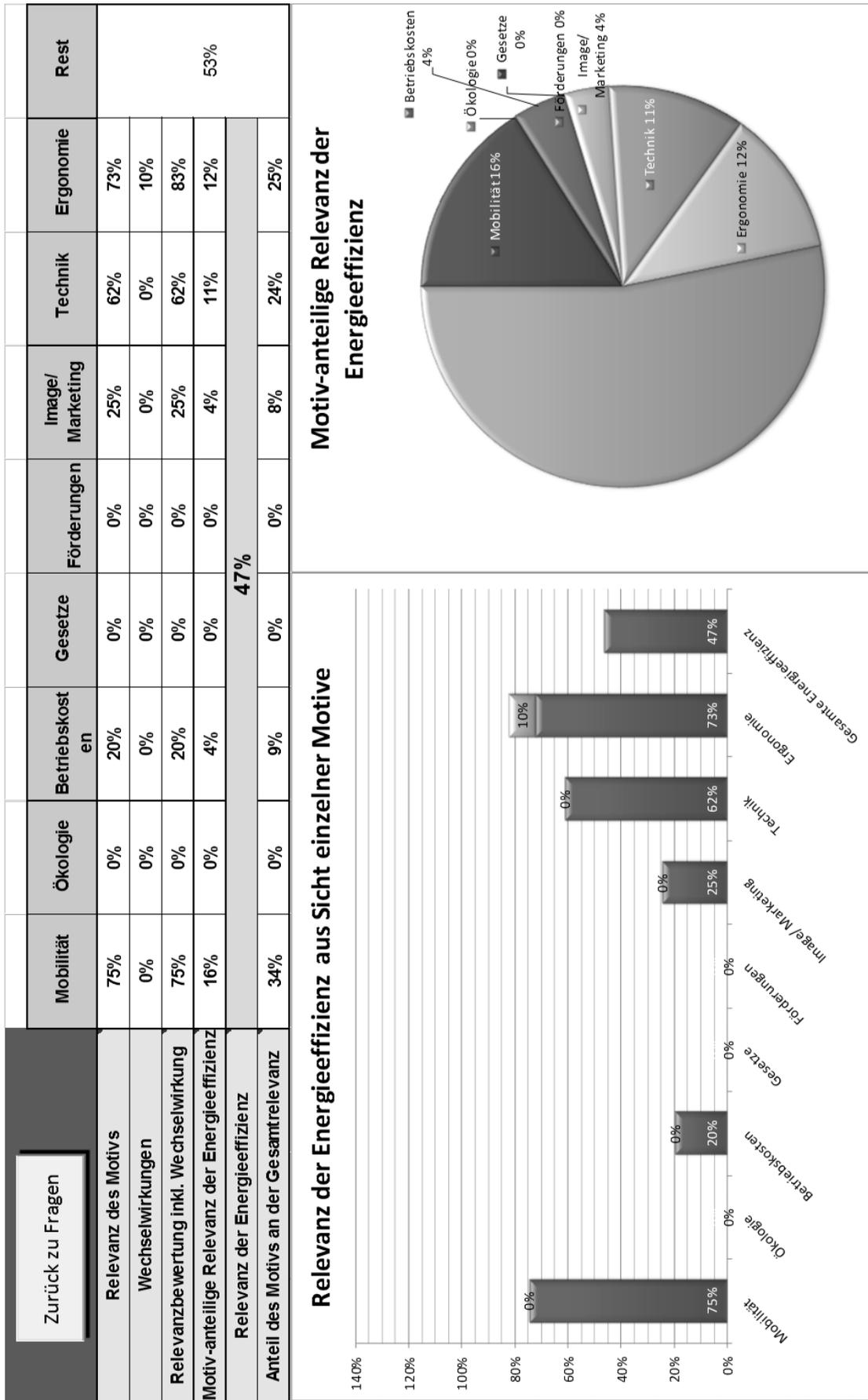


Abbildung 61: Bilanz der projektspezifischen Bewertung der Relevanz der Energieeffizienz.

Entgegen der ursprünglichen Aufgabenstellung, die Energieeffizienz im Sinne des energetischen Wirkungsgrades durch die Reduktion von thermischen Verlusten zu steigern, wird das Wertschöpfungspotenzial der Energieeffizienz als Zielgröße für das Entwicklungsprojekt durch den methodischen Ansatz als sehr beschränkt bewertet (vgl. Abbildung 63). Dies erfolgt auf der Basis einer mit ca. 45% bewerteten projektspezifischen Gesamtrelevanz der Energieeffizienz als Zielgröße und einem technischen Potenzial bzgl. der Energieeffizienz, welches mit deutlich unter 10% berechnet wird.⁴⁰⁹ Hohe Relevanzanteile können mithilfe des Ansatzes den Motiven *Mobilität* und *Ergonomie* zugeordnet werden (Abbildung 62).

Infolge des geringen Wertschöpfungspotenzials wird der Entwicklungsaufwand zur Steigerung der Energieeffizienz reduziert. Der Entwicklungsfokus und die damit verknüpften Ressourcen werden auf die Reduktion der Herstellungskosten verlagert und der Lösungsraum entsprechend angepasst. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der Herstellungskosten.⁴¹⁰

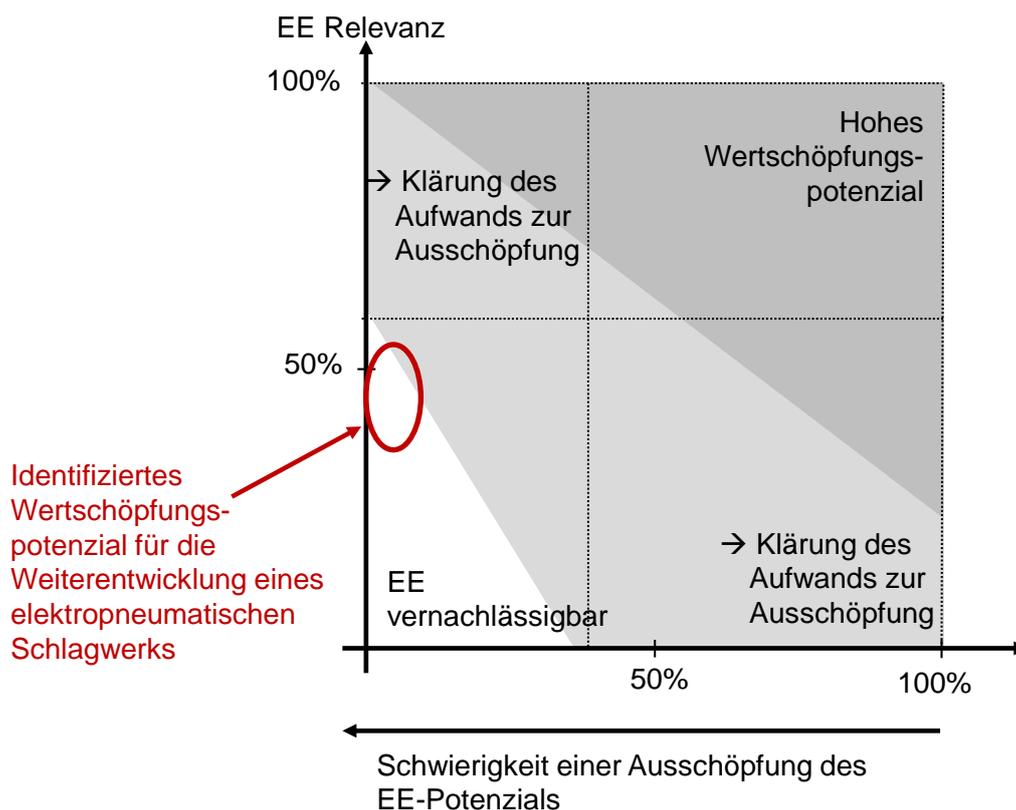


Abbildung 62: Beurteilung des projektspezifischen Wertschöpfungspotenzials der Energieeffizienz als Zielgröße.

⁴⁰⁹ Vgl. Albers; Martin et al. 2014

⁴¹⁰ Vgl. Albers; Martin et al. 2014

Zwischenfazit

Die Anwendung des Vorgehensmodells wird als unterstützend für ein differenziertes und praktisches Verständnis der Energieeffizienz im Rahmen der vorliegenden Entwicklungsaufgabe empfunden.

Durch die frühe und differenzierte Betrachtung und Bewertung der tatsächlichen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße und der darauf aufbauenden Abschätzung des damit einhergehenden Wertschöpfungspotenzials kann die Methode helfen, nicht-zielführende Aktivitäten und Aufwände zur Energieeffizienzsteigerung zu verringern.

9.1.3 Studie „Winkelbohrkopf und Akku-Bohrhammer“

Ebenfalls in Kooperation mit der Hilti Entwicklungsgesellschaft wird eine weitere studentische Abschlussarbeit⁴¹¹ durchgeführt und vom Autor betreut. Konstruktiver Gegenstand der Arbeit ist die Entwicklung von Gestaltungskonzepten für die angulare Umlenkung von Schlagimpulsen elektropneumatischer Bohrhämmer.

Dabei ist eines der erklärten Entwicklungsziele eine Erhöhung der Energieeffizienz, da bestehende Lösungen einen hohen Verschleiß und damit verbunden einen geringen energetischen Wirkungsgrad aufweisen. Zusätzlich werden Studien zur empirischen Untersuchung des praktischen Einsatzes der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode durchgeführt.

Die Studie zum industriepraktischen Methoden- und Werkzeugeinsatz wird an zwei unterschiedlichen Entwicklungsprojekten durchgeführt (*Winkelbohrkopf* und *Akku-Bohrhammer*) und erfolgt jeweils in drei Schritten. Der erste und der letzte Schritt bestehen aus teilstandardisierten Leitfadeninterviews mit vier unterschiedlichen Versuchspersonen (VPs). Im zweiten, chronologisch dazwischenliegenden, Schritt erfolgt eine Beobachtung der Versuchspersonen bei der Erstanwendung des methodischen Ansatzes im entwicklungspraktischen Projektkontext.

Im ersten Interviewteil werden grundlegende Fragen zum jeweiligen Projekt und dem persönlichen Verständnis des Energieeffizienzbegriffs gestellt.⁴¹² Anschließend wird die Methode in Form des Werkzeugs selbstständig durch die Versuchsperson angewendet. Die Ergebnisse der Anwendung werden der Versuchsperson anschließend erläutert, bevor der zweite Interviewteil⁴¹² durchgeführt wird. Dieser hat zum Ziel die Beurteilung des methodischen Ansatzes hinsichtlich Anwendbarkeit,

⁴¹¹ Lorenz 2014 (betreute Abschlussarbeit)

⁴¹² Der vollständige Interview-Leitfaden ist im Anhang (S.194) dokumentiert.

Mehrwertempfinden und industriepraktischer Eignung aus Sicht der Versuchsperson abzufragen. Die Anwendung der Methode zu einer einzelnen Entwicklungsfragestellung durch zwei unterschiedliche am Projekt beteiligte Versuchspersonen macht den Vergleich der Ergebnisse (vgl. Abbildung 66 und Abbildung 67) zu einem wesentlichen Untersuchungsgegenstand dieser Studie.

Um die Ergebnisse der Studie nicht unzulässig zu beeinflussen, werden die Versuchspersonen bei der Anwendung des Ansatzes nach einer kurzen Einführung nicht weiter anleitend unterstützt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit der insgesamt vier Anwendungsfälle. Andererseits führt es jedoch zum Auftreten uneinheitlicher Bewertungen, deren Ursprung nicht ohne Weiteres der Methode oder dem Werkzeug zuzuordnen ist.

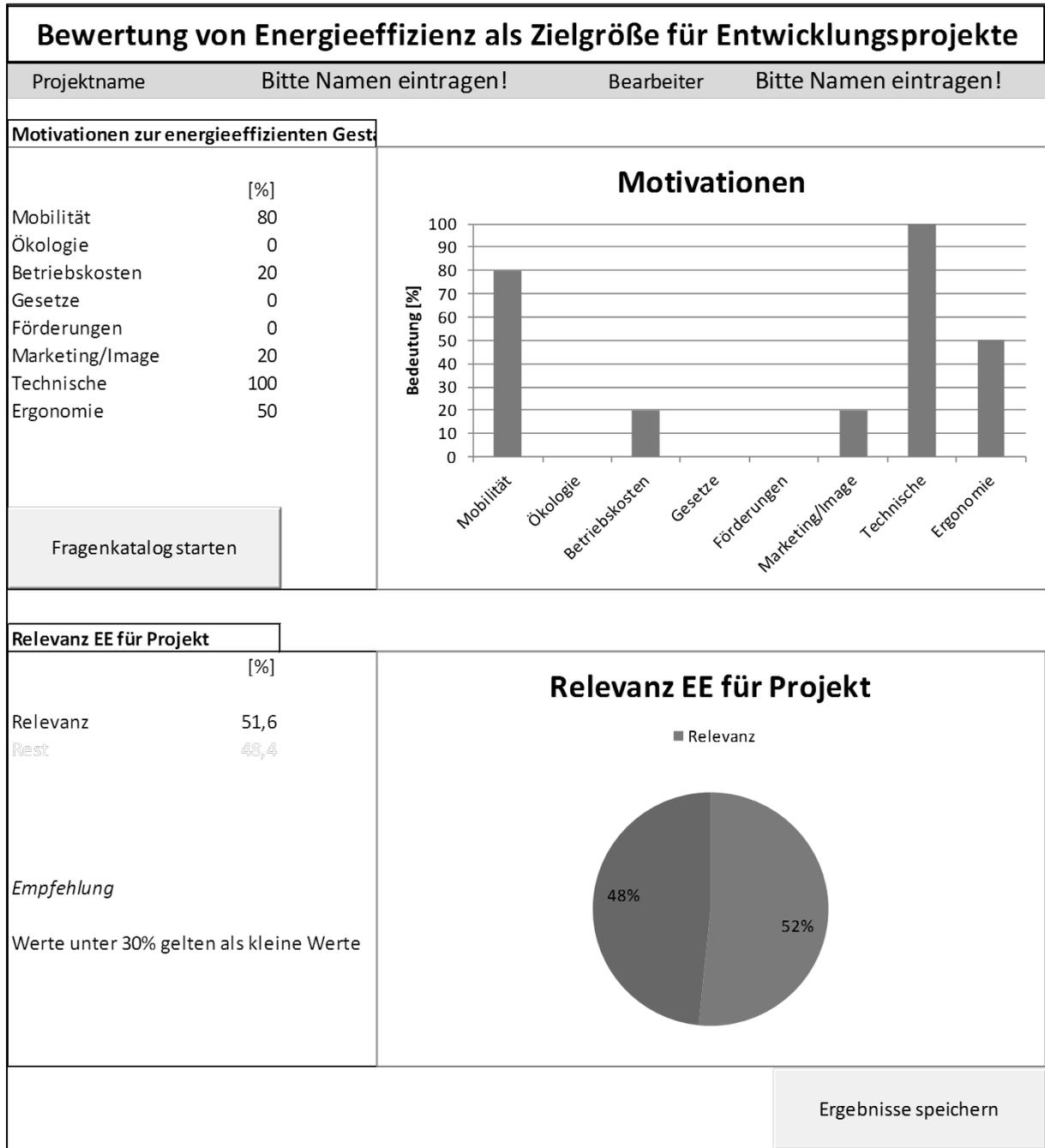
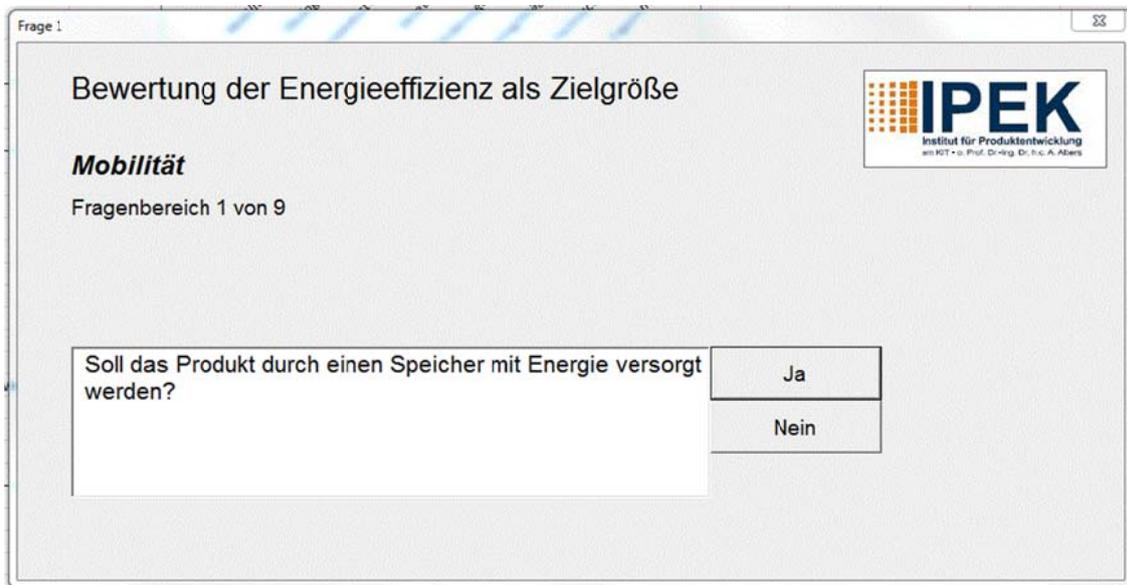


Abbildung 63: Graphische Benutzerschnittstelle des verwendeten Werkzeugs zur validierenden Umsetzung der Methode

Da zu Beginn der Durchführung der validierenden Studie noch keine vollständig anwendbare Werkzeugumsetzung der entwickelten Methode verfügbar ist, wird eine alternative Version des Software-Tools ebenfalls in Microsoft Excel entwickelt (vgl. Abbildung 64). Entsprechend der durch die Methode vorgegebenen Vorgehensweise werden die Fragenreihen hierbei sequenziell durchlaufen. Dabei wird jede Frage in einem eigenen Dialogfenster dargestellt, welches nur für die Dauer der Beantwortung sichtbar und damit veränderbar ist (vgl. Abbildung 65).

LORENZ reduziert die Anzahl der Motive, führt an deren Stelle jedoch zusätzliche Fragegruppen ein, sodass eine vergleichbar differenzierte Untersuchung der Energieeffizienz als Zielgröße im Rahmen der validierenden Studien vorliegt.



The image shows a screenshot of a survey dialog window. The title bar reads 'Frage 1'. The main content area has the title 'Bewertung der Energieeffizienz als Zielgröße' and the category 'Mobilität'. Below the category, it says 'Fragenbereich 1 von 9'. In the top right corner, there is a logo for 'IPEK Institut für Produktentwicklung am KIT • o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers'. The question is 'Soll das Produkt durch einen Speicher mit Energie versorgt werden?' and there are two buttons: 'Ja' and 'Nein'.

Abbildung 64: Darstellung eines Dialogfensters des interaktiven Fragebogens.

Ergebnisse der Studie „Winkelbohrkopf“

Die Gesamtrelevanz der Energieeffizienz für die vorliegende Entwicklungsaufgabe wird mithilfe des methodischen Ansatzes durch zwei projektbearbeitende Versuchspersonen mit 27% (VP3) und 46% (VP4) recht unterschiedlich bewertet. Auch in der Relevanzverteilung bezüglich der verschiedenen zugrunde liegenden Motive bestehen klare Unterschiede. Einzig die Relevanz aus Sicht der technischen Motive wird von beiden Versuchspersonen sehr ähnlich bewertet.

Die Energieeffizienzrelevanz aus Sicht der Mobilität wird von den beiden Versuchspersonen (VP) unterschiedlich beurteilt. Dies lässt sich jedoch durch die im Interview erkannte unterschiedliche Wahl der Systemgrenzen erklären. Während VP3 das Gerät, auf welches der Winkelbohrkopf aufgesetzt wird, außerhalb der Systemgrenzen des Winkelbohrkopfes sieht, berücksichtigt VP4 es als Teil des zu betrachtenden Gesamtsystems. Dies erklärt ebenfalls die darauffolgenden zwangsläufigen Abweichungen in den Folgefragen, was in Abbildung 66 dargestellt ist.

Eine weitere Abweichung entsteht durch eine unterschiedliche Wahl der Betriebskostenzuordnung. Da die professionellen Werkzeuggeräte häufig – aber nicht zwangsläufig ausschließlich – auf Baustellen eingesetzt werden, auf welchen nicht die Anwender selbst, sondern die Bauherren die Stromkosten tragen, hängt eine „richtige“ Antwort hier vom Anwendungsfall ab.

Frage	Abweichung		vermuteter Grund	Antwort-typ	Frage
	Ja	Nein			
1				Ja/nein	Soll der Output des Systems erhöht werden (z.B. Bohrleistung bei Bohrhämmern)?
1.1				Ja/nein	Ist die Leistungsfähigkeit der geplanten Energiequelle ausgereizt?
1.1.1				Ja/nein	Soll thermische Belastung gesenkt werden ?
1.1.1.1				Ja/nein	Soll Verschleiß minimiert werden ?
1..1.1.1.1				Ja/nein	Soll Downsizing angestrebt werden ?
1.1.1.1.1.1				Ja/nein	Sollen auftretende Schwingungen verringert werden?
2			Systemgrenze	Ja/nein	Soll das Produkt durch einen Speicher mit Energie versorgt werden?
2.1			Verzweigung	Qualitativ	Wie lange soll/darf der Energiespeicher halten?
2.1.1			Verzweigung	Einordnung	Soll es möglich sein, den Energiespeicher aufzuladen oder auszutauschen?
2.1.1.1			Verzweigung	Qualitativ	Wie lange wird es dauern, den/die Energiespeicher zu laden/füllen?
2.1.1.1.1				Qualitativ	Wie gut ist die Infrastruktur (Stromnetz zum Laden, Tankstellen, etc.) am Einsatzort ausgebaut?
2.1.1.2				Qualitativ	Wie hoch wird der Aufwand für den Transport zusätzlicher Energiespeicher sein? (Hängt hauptsächlich am Gewicht)
2.1.1.3				Ja/nein	Soll die Lebensdauer des Produktes unabhängig von der zur Verfügung stehenden Energiemenge sein?
3				Einordnung	Welche Energieform soll als Energiequelle verwendet werden?
3.1			Anwendungsfall	Ja/nein	Trägt der Käufer des Produktes die durch den Energieverbrauch verursachten Betriebskosten?
3.1.1				Ja/nein	Gibt es Förderungen bezüglich Energieeffizienz, die das Unternehmen in Anspruch nehmen kann?
4				Ja/nein	Gibt es Gesetze oder Verordnungen bezüglich Energieeffizienz die das Produkt betreffen?
5				Ja/nein	Soll die Kraft des Anwenders für die Funktion des Produkt genutzt werden ?
5.1			Ab-schätzung	Qualitativ	Wie hoch wird die physische Belastung sein? Bei Unklarheiten über Höhe der Belastung passende Analyse-methode verwenden.
6				Ja/nein	Soll der Kunde über die Umweltverträglichkeit des Produktes informiert werden (Labels, etc.)?
6.1				Ja/nein	Gibt es freiwillige Verpflichtungen des Unternehmens bezüglich Energieeffizienz ?
6.1.1			Definition	Ja/nein	Soll das Produkt aufgrund von Marketingvorgaben energieeffizient gestaltet werden?

Abbildung 65: Ausschnitt aus dem Fragenverlauf mit Gegenüberstellung der Antworten der beiden Versuchspersonen zur Studie „Winkelbohrkopf“

Die unterschiedliche Einschätzung der Relevanz aus außendarstellungsbezogenen Gründen konnte ebenfalls im Rahmen der Interviews geklärt werden. VP4 berichtet, dass es tatsächlich Vorgaben von der Marketingabteilung gab, das Produkt energieeffizient zu gestalten, um Wettbewerbsvorteile zu bewahren. Dies war VP3 nicht bekannt.

Ergebnisse der Studie „Akku-Bohrhammer“

In gleicher Weise erfolgt die Studie einer retrospektiven Anwendung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode auf die bereits abgeschlossene Produktgenerationenentwicklung des Akku-betriebenen Bohrhammers Hilti TE 6A.

Die Bewertungen der Gesamtrelevanz durch die zwei unabhängigen Anwendungen des methodischen Ansatzes fallen mit 29% (VP2) und 40% (VP3) etwas weniger unterschiedlich aus, als bei der Studie zum Projekt „Winkelbohrkopf“. Die Gründe für die Abweichungen können auch bei dieser Studie durch die Interviews identifiziert und erklärt werden.

Die beiden Versuchspersonen stimmen grundsätzlich in ihrer hohen Bewertung der technisch-funktionalen und außendarstellungsbezogenen Motive überein. Dies entspricht auch Ihren Aussagen im Rahmen der Interviews, wonach die Energieeffizienzziele maßgeblich vom Marketing angestoßen wurden.

Die Abweichung bei den Antworten zu den technisch-funktionalen Motiven einer Verwendung von Energieeffizienzzielen (vgl. Abbildung 67) lässt sich auf einen unterschiedlichen Zeitpunkt des Projekteintritts der beiden Versuchspersonen zurückführen. Demnach kam VP1 deutlich später zum Projektbearbeitungsteam hinzu, als VP2. Zu diesem späteren Zeitpunkt war das Zielsystem naturgemäß bereits erheblich erweitert worden. Dabei hatte die Energieeffizienz nach Aussage der Entwicklungsingenieure in der Zwischenzeit tatsächlich explizit an Bedeutung für das Projekt gewonnen.

Die unterschiedliche Bewertung der ökonomischen und außendarstellungsbezogenen Motive kann maßgeblich einer missverständlichen Formulierung („soll“ impliziert Absichtstendenz) der Fragen sowie einem unterschiedlichem Verständnis der Systemgrenzen zugeordnet werden (vgl. Abbildung 67).

Außerdem werden im Zuge der Studie ein uneinheitliches Verständnis und entsprechend abweichende Antworten beobachtet (Frage 6), welche durch bereits bestehende erklärende Hinweise (mittels Mouse-over Funktion) vermieden werden sollten. Die Versuchspersonen ignorieren die Hinweise jedoch weitestgehend, weshalb nach dieser Studie eine dauerhafte Sichtbarkeit der Hinweise anstelle der Mouse-over Funktion umgesetzt wurde.

Frage	Abweichung		vermuteter Grund	Antwort-typ	Frage
	Ja	Nein			
1				Ja/nein	Soll der Output des Systems erhöht werden (z.B. Bohrleistung bei Bohrhämmern)?
1.1				Ja/nein	Ist die Leistungsfähigkeit der geplanten Energiequelle ausgereizt?
1.1.1			Projekt-verlauf	Ja/nein	Soll thermische Belastung gesenkt werden ?
1.1.1.1			Projekt-verlauf	Ja/nein	Soll Verschleiß minimiert werden ?
1.1.1.1.1				Ja/nein	Soll Downsizing angestrebt werden ?
1.1.1.1.1.1			Projekt-verlauf	Ja/nein	Sollen auftretende Schwingungen verringert werden?
2				Ja/nein	Soll das Produkt durch einen Speicher mit Energie versorgt werden?
2.1				Qualitativ	Wie lange soll/darf der Energiespeicher halten?
2.1.1				Einord-nung	Soll es möglich sein, den Energiespeicher aufzuladen oder auszutauschen?
2.1.1.1			Abschät-zung	Qualitativ	Wie lange wird es dauern, den/die Energiespeicher zu laden/füllen?
2.1.1.1.1				Qualitativ	Wie gut ist die Infrastruktur Stromnetz zum Laden, Tankstellen, etc.) am Einsatzort ausgebaut?
2.1.1.2				Qualitativ	Wie hoch wird der Aufwand für den Transport zusätzlicher Energiespeicher sein? (Hängt hauptsächlich am Gewicht)
2.1.1.3				Ja/nein	Soll die Lebensdauer des Produktes unabhängig von der zur Verfügung stehenden Energiemenge sein?
3				Einord-nung	Welche Energieform soll als Energiequelle verwendet werden?
3.1				Ja/nein	Trägt der Käufer des Produktes die durch den Energieverbrauch verursachten Betriebskosten?
3.1.1			System-grenze	Ja/nein	Gibt es Förderungen bezüglich Energieeffizienz, die das Unternehmen in Anspruch nehmen kann?
4				Ja/nein	Gibt es Gesetze oder Verordnungen bezüglich Energieeffizienz die das Produkt betreffen?
5			Definition	Ja/nein	Soll die Kraft des Anwenders für die Funktion des Produkt genutzt werden ?
5.1			Ver-zweigung	Qualitativ	Wie hoch wird die physische Belastung sein? Bei Unklarheiten über Höhe der Belastung passende Analyse-methode verwenden.
6			Ver-ständnis	Ja/nein	Soll der Kunde über die Umweltverträglichkeit des Produktes informiert werden (Labels, etc.)?
6.1				Ja/nein	Gibt es freiwillige Verpflichtungen des Unternehmens bezüglich Energieeffizienz ?
6.1.1				Ja/nein	Soll das Produkt aufgrund von Marketingvorgaben energieeffizient gestaltet werden?

Abbildung 66: Ausschnitt aus dem Fragenverlauf mit Gegenüberstellung der Antworten der beiden Versuchspersonen zur Studie „Bohrhammer“

Zwischenfazit

Der vollständige Mehrwert, welcher durch den Einsatz des in der vorliegenden Arbeit entwickelten methodischen Ansatzes entsteht, kann erst durch eine iterative projekt-, oder produktgruppenspezifische Anpassung bewertet werden. Die dem generischen Stand der Methode entsprechenden eher abstrakten Empfehlungen führen daher zu einer eher kritischen Wahrnehmung des Mehrwerts durch die Versuchspersonen.

Identifizierte mögliche Gründe für eine beschränkte Reproduzierbarkeit der Relevanzbewertung durch unterschiedliche Versuchspersonen sind eine individuelle Wahl der impliziten und expliziten Systemgrenzen sowie die unzureichende Nutzung von zur Verfügung stehenden Verständnishinweisen in der Software-Umsetzung. Gerade die in Methode und Werkzeug einführenden Informationen sind jedoch mitverantwortlich für die Wahl der Systemgrenzen durch den Benutzer bei der Beantwortung der Fragen. Da hierbei jedoch ein projektspezifisches Initialverständnis ermöglicht werden muss, kann eine einführende Klärung von Begriffsverständnis und Wahl der Systemgrenzen beispielsweise gemeinsam im Projektteam erfolgen und im Werkzeug mit abgespeichert werden. So würde auch einer uneinheitlichen Verwendung individueller (da nicht explizit definierter) mentaler (Referenz-) Anwendungsfälle vorgebeugt, welche ansonsten zu vermeidbaren unterschiedlichen Bewertungen der Energieeffizienzrelevanz für dasselbe Projekt führen.

Die Anwendung des Ansatzes zu unterschiedlichen Projektzeitpunkten führt bei sich verändernden Randbedingungen zu einer entsprechend unterschiedlichen Relevanzbewertung, was die Aussagekraft des Vorgehens grundsätzlich positiv erscheinen lässt.

Die werkzeugseitige Umsetzung mittels einzelnen Visual Basics Userforms für jede einzelne Fragen zeigt ein hohes Maß an Anwenderfreundlichkeit bei der Verwendung des Werkzeugs. Die Anpassung im jeweiligen Unternehmenskontext wird durch diese aufwendige Form der Modellierung jedoch erheblich erschwert.

9.1.4 Studie „Elektrofahrzeug im Kontext Regional Eco Mobility 2030“

Das Innovationscluster Regional ECO Mobility 2030 ist ein gemeinsames Projekt der Fraunhofer-Institute ICT, IOSB, ISI und IWM, und des Zentrums Mobilitätssysteme am Karlsruher Institut für Technologie. Das Teilprojekt, an welchem die Forschungsgruppe Systemische Mobilität des IPEK – Institut für Produktentwicklung maßgeblich beteiligt ist, hat die konzeptionelle Entwicklung eines Elektrofahrzeugs für Autobahn und Stadtverkehr zum Ziel.

Ein Vergleich der Energieeffizienz von E-Mobilen mit der von konventionell angetriebenen Kraftfahrzeugen ist prinzipiell möglich. Praktisch relevante Aussagen aus einem solchen Vergleich abzuleiten ist jedoch weitaus schwieriger. So beeinflusst die Verfügbarkeit der Energie, ihre ökologischen Eigenschaften, ihr Preis sowie ihre Energiedichte die tatsächliche Energieeffizienz mehr, als ein bloßes

kWh/100km.⁴¹³ Im Rahmen dieses Projekts wird der entwickelte methodische Ansatz genutzt, um die Energieeffizienzziele hinsichtlich ihrer projektspezifischen Bedeutung und Wichtigkeit zu bewerten und die Relevanzbeurteilung sowie die motivbezogene Relevanzverteilung mit den Einschätzungen des Projektleiters zu vergleichen.

Der entwickelte Ansatz zur Systematisierung der Energieeffizienz kann auf diese Weise validiert werden. Eine retrospektive Anwendung des Werkzeugs auf den Projektkontext zeigt die in Abbildung 68 dargestellte motivbezogene Relevanzverteilung. Die Gesamtrelevanz der Energieeffizienz als Zielgröße für das untersuchte Entwicklungsvorhaben wird mit 68% bewertet. Da auch Elektrofahrzeuge heute bereits in die Flottenverbrauchsberechnungen der Fahrzeughersteller miteinbezogen werden, spielen auch bei ihrer Entwicklung rechtliche Überlegungen eine entscheidende Rolle für die Energieeffizienz als Zielgröße. Dabei werden auch zukünftige mögliche Auswirkungen neuer Gesetzgebungen zu nicht-lokal verursachten Emissionen berücksichtigt. Dies führt zu der hohen Bewertung der Relevanz rechtlicher Motivanteile (110%). Werte von über 100% können hierbei durch die additive Verrechnung von Relevanzanteilen aus Wechselwirkungseffekten entstehen. Die ebenfalls hohen Bewertungen der Relevanz aus Sicht der Mobilität (78%) und der Betriebskosten (72%) sind vergleichsweise einfach nachzuvollziehen:

Für die Bewertung der Betriebskostenrelevanz wird ein Anschaffungspreis von 20.000€, eine Lebensdauer von ca. 10 Jahren sowie Stromkosten von 0,29 Cent/kWh angesetzt, was durch das mit der Entwicklung anvisierte Marktsegment bzw. Produktprofil begründet ist. Die Kosten eines neuen Energiespeichers für den Kunden werden mit 3100€ festgelegt, basierend auf den Batteriekosten für das Jahr 2014, die THIELMANN ET AL. mit 400€/kWh angeben.⁴¹⁴ Eine hohe Unschärfe muss hierbei jedoch bei der Einschätzung von Nutzungshäufigkeit und Nutzungsintensität berücksichtigt werden.

⁴¹³ Vgl. Pirker 2008

⁴¹⁴ Vgl. Thielmann; Sauer et al., S.4

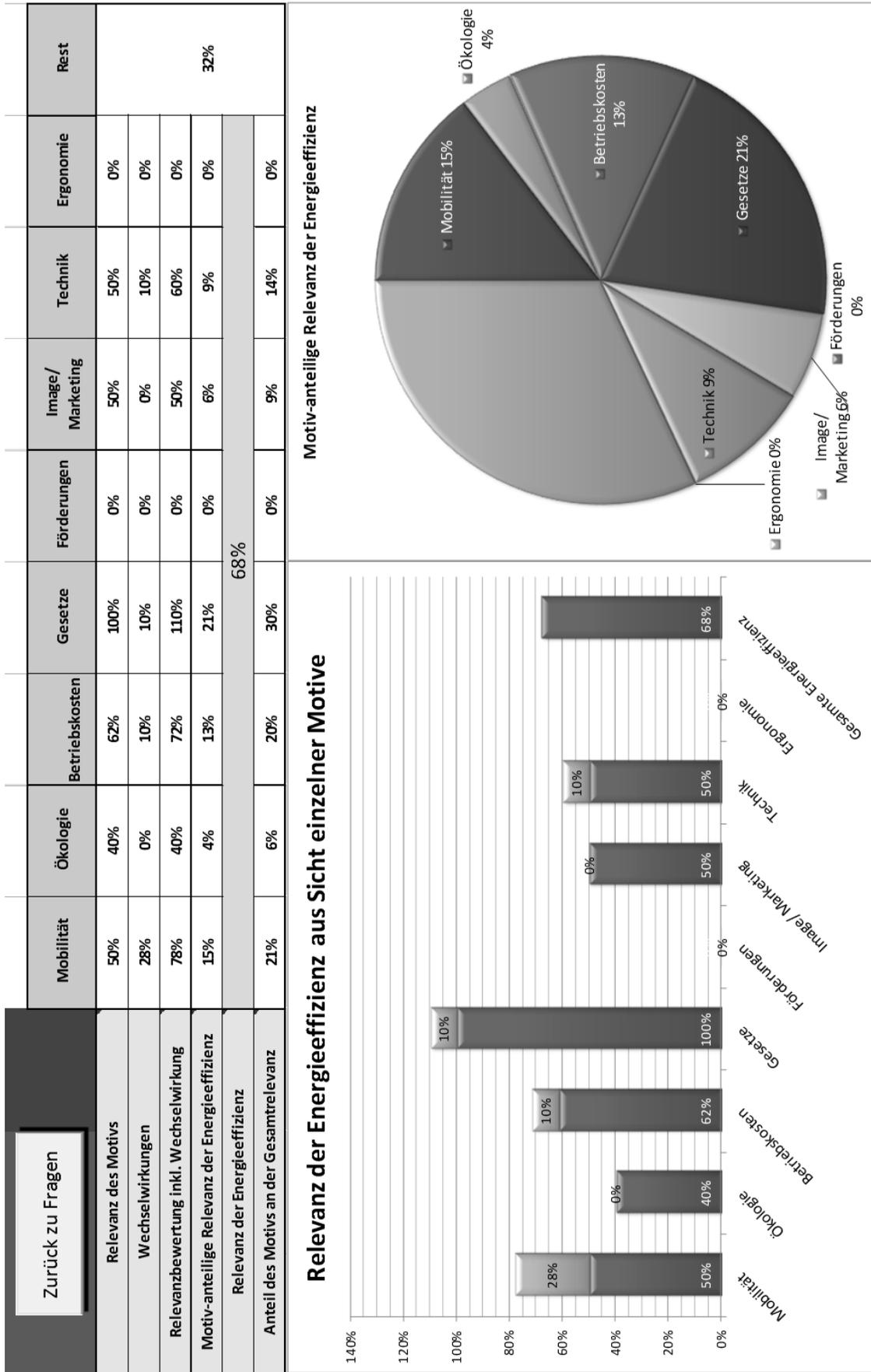


Abbildung 67: Ausschnitt der Ergebnisansicht zu einer Beurteilung der Energieeffizienzrelevanz für die Entwicklung eines Elektrofahrzeugs im Projektkontext „REM 2030“. ⁴¹⁵

Eine anschließende Auswertung und Diskussion der Ergebnisse mit dem Projektleiter zeigt eine große Übereinstimmung zwischen der Relevanzbewertung durch das Werkzeug und den im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen. Insbesondere werden die Bewertung der Gesamtrelevanz und die motivspezifische Relevanzverteilung als zutreffend, nachvollziehbar und hilfreich für ein differenziertes Verständnis der Energieeffizienz und den zielführenden Ressourceneinsatz im Projektkontext beurteilt.⁴¹⁵

Zwischenfazit

Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen der Relevanzbewertung durch den methodischen Ansatz und den im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen der tatsächlichen Relevanz gezeigt werden. Die Auseinandersetzung mit den Fragen zur projektspezifischen Bedeutung und Relevanz der Energieeffizienz führt zu einer Sensibilisierung bezüglich des Zielverständnisses aufseiten des Entwicklers. Außerdem werden die Bewertungen sowohl der Gesamtrelevanz, als auch der motivspezifischen Relevanzverteilung als zutreffend und hilfreich für das Verständnis der Energieeffizienz im Projektkontext beurteilt.

9.2 Ergebnisse und Reflexion

Es wurden fünf Studien zur praktischen Anwendung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten methodischen Vorgehens durchgeführt. Dabei wurde sowohl die systematische und differenzierte Verwendung der Energieeffizienz als Zielgröße untersucht, als auch deren entsprechende Formulierung mithilfe des entwickelten Utility-Based Energy Efficiency Indicators (UBEEI).

Grundsätzlich konnte im Rahmen der validierenden Studien bestätigt werden, dass mithilfe der entwickelten Methode ein differenziertes und objektiviertes Verständnis der Energieeffizienz als Zielgröße entwickelt werden kann. Dabei kann eine zielgerichtete Produktentstehung in mehrfacher Hinsicht unterstützt werden:

- Auf Basis der Auflösung der Zielrelevanz nach den einzelnen zugrunde liegenden Motiven kann eine Identifikation von wesentlichen – zuvor nicht ausreichend berücksichtigten – Einflussfaktoren erfolgen, was die Entwicklung innovativer Lösungen unterstützt (vgl.9.1.1). Diese Einflüsse können mittels des UBEEI angemessen in der quantitativen Zielformulierung berücksichtigt werden.

⁴¹⁵ Vgl. Martin, 2014

- Im Gegenzug kann die Identifikation unwesentlicher Aspekte, unerwartet geringer tatsächlicher Energieeffizienzrelevanz oder eines unverhältnismäßig geringen Wertschöpfungspotenzials eine entsprechende Vernachlässigung oder Ressourcenumverteilung auslösen, welche ebenso einen zielgerichteten und effizienten Produktentwicklungsprozess unterstützt. (vgl. Abschnitt 9.1.2)
- Die weiterführenden Hinweise und Empfehlungen im Rahmen der Werkzeuganwendung können sowohl zu einem differenzierten und zielgerichteten Zielverständnis beitragen, als auch im Sinne einer „erinnernden“ Checkliste angewandt werden. Sie wurden von den Entwicklern grundsätzlich als hilfreich empfunden, können jedoch naturgemäß erst in der unternehmens- oder projektspezifisch angepassten Form ihren vollen Mehrwert entfalten.
- Die bewusste Auseinandersetzung mit einer differenzierenden Klärung von Zielrelevanz und der zugrunde liegenden Motivation führt bereits zu einer Sensibilisierung der beteiligten Entwickler bezüglich der Energieeffizienz als Zielgröße. Dies führt zu einem bewussteren Verständnis und entsprechender Formulierung der zuvor sehr generischen Zielgröße.
- Bei den retrospektiv durchgeführten Studien konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Relevanzbewertung nach einzelnen Motiven durch den methodischen Ansatz und den im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen der sich tatsächlich entwickelnden Relevanzverteilung und -höhe festgestellt werden.

Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass die identifizierten Zusammenhänge von verwendetem Vorgehen und erzielten Ergebnissen nicht eindeutig kausal zugeordnet werden können. Eine tatsächliche Steigerung der Energieeffizienz basiert in der Regel auf technischen Analysen sowie individueller und unternehmensbezogener Erfahrung. Die entwickelte Methode unterstützt hierbei die Entwicklung von geeigneten und möglichst objektivierten Zielverständnissen, und ermöglicht so eine geeignete Fokussierung und Zielpriorisierung.

Die Verwendung einer einheitlichen generischen Gewichtung der einzelnen Motive bei der Relevanzbewertung erfolgt einerseits zur Bewahrung einer neutralen und vergleichbaren Grundlage bei der empirischen Untersuchung des Ansatzes und begründet sich andererseits mit dem fehlenden Zugang zu unternehmensstrategischen Überlegungen und Vorgaben. Dies führt zu suboptimalen Voraussetzungen bei der Relevanzbewertung, welche dennoch konsistente und durch die Anwender als sinnvoll erachtete Ergebnisse liefert.

Die Verwendung durch unterschiedliche an einem gemeinsamen Projekt beteiligte Versuchspersonen in der industriepraktischen Produktentwicklung zeigt eine unzureichende Reproduzierbarkeit der Relevanzbewertung durch unterschiedliche

Versuchspersonen auf Basis individueller Wahl der Systemgrenzen oder Begriffsverständnisse (vgl. Abschnitt 9.1.3). Hier könnte eine Einführung mittels einer Referenzanwendung (ggf. im Projektteam) Abhilfe schaffen, bei welcher die zu berücksichtigenden Begriffsdefinitionen und Betrachtungsräume beispielsweise in den Hinweiskästen dokumentiert werden.

Die Umsetzung des Ansatzes zur Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße in Form eines softwarebasierten Werkzeugs ermöglicht eine einfache und schnelle Anwendung der Methode. Eine praktische Anwendung des Werkzeugs benötigt in der Regel unter zehn Minuten. Die darauf aufbauende Erstellung von geeigneten Energieeffizienzindikatoren zur Zielformulierung dauert dagegen je nach bestehendem Informationsstand eine bis mehrere Stunden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Bedarf einer systematischen und differenzierten Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße im industriepraktischen Entwicklungsumfeld untersucht und entsprechende Ansätze zur Objektivierung von Energieeffizienzzielen entwickelt sowie ihre Eignung abschließend untersucht.

Im Rahmen einer empirischen Studie mit 35 Entwicklungsingenieuren unterschiedlicher Firmen, Branchen und Tätigkeitsbereiche wurde entsprechend der ersten Forschungsfrage der Bedarf an einer gezielten Unterstützung des Entwicklers im verständnis- und kommunikationsorientierten Umgang mit der Zielgröße Energieeffizienz aufgezeigt. Ein weiterer Bedarf wurde in der Unterstützung der Bewertung von projektspezifischer Wichtigkeit und projektspezifischem Wertschöpfungspotenzial bezüglich der Energieeffizienz als Zielgröße identifiziert. Die quantitative und aussagekräftige Formulierung der Energieeffizienzziele sowie die Berücksichtigung der dabei geltenden Systemgrenzen stellt eine weitere praktische Herausforderung dar. Die Studie bestätigte außerdem die Existenz unterschiedlicher und differenziert zu betrachtender Motive. Mittels der projektspezifischen Gesamtausprägung der Basismotive (ökologische, ökonomische, technische-funktionale, Außendarstellungsbezogene sowie rechtliche Motive) ließ sich die Motivation zur Berücksichtigung von Energieeffizienzzielen angemessen differenziert abbilden.

Das zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage entwickelte Vorgehen zur *Systematisierung* des Umgangs mit der generischen Zielgröße Energieeffizienz basiert auf einer Erfassung von Informationen zu Nutzenprofilen, Produktzielen, bestehenden Erfahrungen aus Vorgängerprojekten sowie bestehenden Randbedingungen. Aus den Bewertungen dieser Informationen durch den Entwickler sowie durch hinterlegte Wechselwirkungs- und Erfahrungsmodelle werden die projektspezifische Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße, deren Verteilung auf einzelne Motive sowie Hinweise und Empfehlungen für eine zielgerichtete Handhabung der Energieeffizienz abgeleitet und dem Entwickler zur Verfügung gestellt. Die Systematisierung besteht aus einem *generischen* und einem im Unternehmens- und Projektkontext anzupassenden *adaptiven* Teil.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen *Systematisierung* wurde als Antwort auf die dritte Forschungsfrage im Rahmen der *Operationalisierung* ein Ansatz zur Erstellung von Energieeffizienz-Kenngrößen entwickelt, deren spezifischer Einsatzzweck die Quantifizierung von Energieeffizienzzielen für die

Produktnutzungsphase ist. Dies beinhaltet die Identifikation und Auswahl relevanter Nutzenmerkmale, deren Gewichtung, Bewertung und Aggregation sowie die abschließende Gegenüberstellung des energetischen Aufwands.

Die beiden im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze wurden in einem durchgängigen Vorgehen zusammengefasst und die wesentlichen Schritte in softwarebasierten Werkzeugen umgesetzt, um eine Validierung im industriepraktischen Entwicklungsumfeld zu ermöglichen. Abschließend wurde das Vorgehen in fünf Studien im Rahmen verschiedener Entwicklungsprojekte mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten validiert. Dabei wurden angestrebte Vorteile, wie die Unterstützung eines differenzierten und motivbewussten Verständnisses der Energieeffizienzziele und einer Formulierung entsprechender Kenngrößen bestätigt. Ebenso wurde die Notwendigkeit einer Adaptierbarkeit der anleitenden Hinweise sowie der abschließend abgeleiteten Empfehlungen für eine effektive Anwendung der Methode bestätigt.

Mit dem entwickelten Ansatz werden dem Produktentwickler eine Methode und ein entsprechendes Werkzeug für die Aktivitäten der Profildefinition zur Verfügung gestellt, welche die Objektivierung der Energieeffizienz als Zielgröße unterstützen. Diese werden im Sinne der Karlsruher Schule⁴¹⁶ im Rahmen des integrierten Produktentstehungsmodells in den betroffenen Problemlösungsaktivitäten (vgl. Abbildung 48) hinterlegt und können damit situationsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Für eine zielgerichtete Planung und Anwendung der entwickelten methodischen Unterstützung wird zusätzlich ein Referenzmodell vorgeschlagen (vgl. Abbildung 50), welches eine Empfehlung für die Inhalte und zeitlichen Abläufe der einzelnen Aktivitäten aus Projektplanungssicht darstellt.

10.2 Ausblick

Im Kontext der Entwicklung energieeffizienter Produkte ist es notwendig, die projektspezifische Bedeutung und Relevanz differenziert zu untersuchen um ein angemessen objektiviertes und kollektives Verständnis der Energieeffizienz als Zielgröße zu fördern und so eine zielführende und wertschöpfungspotenzialorientierte Handhabung zu ermöglichen. Dabei kann das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Vorgehen den Entwickler bereits maßgeblich unterstützen.

Der hier vorgestellte Ansatz zur Operationalisierung fokussiert dabei die Nutzungsphase aktiver Produkte, da diese bei der Entwicklung energieeffizienter Produkte eine besonders wichtige Rolle spielt. Durch eine Übertragung oder Erweiterung der

⁴¹⁶ Vgl. Abschnitt 2.1.2

entwickelten Methode auf andere Produktlebenszyklusphasen, wie Herstellung und Entsorgung könnten die Ansätze weiterentwickelt werden.

Durch eine weitere Validierung der Operationalisierung mittels des entwickelten Energieeffizienzindikators UBEEI ist die Erfassung zusätzlicher Erfahrungswerte zur entwicklungspraktischen Anwendung interessant. Dies gilt insbesondere für die Dekomposition von übergeordneten Relevanz- und Potenzialbewertungen sowie von entsprechenden Energieeffizienzzielen auf Subzielsystem-⁴¹⁷ bzw. Baugruppen- und Bauteilebene, gegebenenfalls unter Berücksichtigung etwaiger Wechselwirkungs- oder Emergenzeffekte.

⁴¹⁷ Vgl. Meboldt 2008, S.158

11 Literaturverzeichnis

Abele et al. 2008

Abele, E. ; Anderl, R. ; Birkhofer, H.: EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008.

Ahrens 2000

Ahrens, G.: Das Erfassen und Handhaben von Produkthanforderungen - Methodische Voraussetzungen und Anwendung in der Praxis. Berlin, Technische Universität Berlin (Maschinenkonstruktion), Dissertation, 2000.

Albers et al. 2005

Albers, A. ; Burkardt, N. ; Meboldt, M. ; Saak, M.: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: Samuel, A. und Lewis, W. (Hg.). *15th International Conference on Engineering Design - ICED 05: Engineering design and the global economy* (Melbourne 2005). Barton, A.C.T.: Engineers Australia, 2005.

Albers et al. 2010

Albers, A. ; Muschik, S. ; Ebel, B.: Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung. In: Gausemeier, J. (Hg.): *6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung* (Berlin 2010), 2010.

Albers 2010a

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: Horváth, I. (Hg.). *Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010: Virtual Engineering for Competitiveness* (Ancona 2010). Delft: Faculty of Industrial Design Engineering Univ. of Technology, 2010.

Albers 2011b

Albers, A.: Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2011*, 2011.

Albers et al. 2011

Albers, A. ; Lohmeyer, Q. ; Ebel, B.: Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In: Maier, A. M., Mouggaard, K., Howard, T. J. und McAloone, T. (Hg.). *18th International Conference on Engineering Design - ICED 11: Impacting Society through Engineering Design, Bd. 2* (Kopenhagen 2011). Kopenhagen: Design Society, 2011, S. 256–265.

Albers et al. 2011a

Albers, A. ; Ebel, B. ; Alink, T.: Erfolgsfaktoren der Interdisziplinarität. Ein Bericht. Wissenschaft im Kontext. Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis. In: Banse, G. und Fleischer, L.-G. (Hg.): *Wissenschaft im Kontext. Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis*. Berlin: trafo Wissenschaftsverlag 2011, S. 203–214.

Albers et al. 2011

Albers, A. ; Martin, P. ; Lorentz, B.: Modeling and Design of Contacts in Electrical Connectors. In: Maier, A. M., Mouggaard, K., Howard, T. J. und McAloone, T. (Hg.). *18th International Conference on Engineering Design - ICED 11: Impacting Society through Engineering Design* (Kopenhagen 2011). Kopenhagen: Design Society, 2011.

Albers et al. 2012b

Albers, A. ; Ebel, B. ; Lohmeyer, Q.: Systems of objectives in complex product development. In: *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012: Mobile and ubiquitous technologies for global product development and production processes* (Karlsruhe 2012), 2012.

Albers 2012

Albers, A. (2012): Wissenschaftliches Gespräch. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 07.11.2012, persönliches Gespräch an P. Martin. Protokoll.

Albers 2013c

Albers, A. (2013): Wissenschaftliches Gespräch. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 22.10.2013, persönliches Gespräch an P. Martin. Protokoll.

Albers et al. 2014

Albers, A. ; Martin, P. ; Geiger, S.: Analyzing the Project-Specific Relevance of Energy Efficiency as a Design Objective. In: Marjanović, D. (Hg.). *13th International Design Conference - DESIGN 2014: Proceedings* (Dubrovnik 2014), 2014.

Albers 2014d

Albers, A.: Produktentstehung - Entwicklungsmethodik. Skriptum zur Vorlesung SS 14, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.

Albers 2014e

Albers, A. (2014): Wissenschaftliches Gespräch. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 04.02.2014, persönliches Gespräch an P. Martin. Protokoll.

Albers / Braun 2011

Albers, A. ; Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. Handbuch Leichtbau. In: Henning, F. und Moeller, E. (Hg.): *Handbuch Leichtbau*. Methoden, Werkstoffe, Fertigung: Hanser Verlag, 2011, S. 5–30.

Albers / Düser 2011

Albers, A. ; Düser, T.: Validierung im Produktentstehungsprozess. Handbuch Leichtbau. In: Henning, F. und Moeller, E. (Hg.): *Handbuch Leichtbau*. Methoden, Werkstoffe, Fertigung: Hanser Verlag 2011, S. 133–142.

Albers / Martin 2012

Albers, A. ; Martin, P.: Projektbericht zu "Entwicklung neuartiger Kontaktelemente für Hochstromanwendungen". Hg. v. AIF, Abschlussbericht (KF2144404PRO), 2012.

Albers / Martin 2013

Albers, A. ; Martin, P.: Projektbericht zu "Entwicklung von energieeffizienten Hochstrom-Steckverbindern durch besonders hohe Kontaktkräfte sowie des energieeffizienten Herstellverfahrens". Hg. v. AIF, Abschlussbericht (KF 2144414 PR1), 2013.

Albers / Meboldt 2007

Albers, A. ; Meboldt, M.: IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: Bocquet, J.-C. (Hg.). *International Conference on Engineering Design - ICED 07: Proceedings* (Paris 2007): Design Society, 2007.

Albers / Muschik 2010

Albers, A. ; Muschik, S.: Development of Systems of Objectives in Early Activities of Product Development Processes. In: Horváth, I. (Hg.). *Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010: Virtual Engineering for Competitiveness* (Ancona 2010). Delft: Faculty of Industrial Design Engineering Univ. of Technology, 2010.

Alink 2010

Alink, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2010.

Atlas ACA 2014

Atlas ACA, G. (2014): Kostenkalkulation Hochstromsteckverbinder, 14.02.2014, schriftlich an P. Martin. digital.

Bader 2007

Bader, J. J.: Die Hauptstellgrößen des Produktzielmanagements am Beispiel der Automobilentwicklung. München : Dr. Hut, 2007.

BAuA 2012

BAuA: Leitmerkmalermethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen. Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2012.

Bauer 2009

Bauer, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Düsseldorf : VDI-Verl. (Fortschrittberichte VDI / 1, Nr. 404), 2009.

Bibliographisches Institut 2014

Bibliographisches Institut (Hg.): Duden. online 2014. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/>, zuletzt aktualisiert am 22.01.2014, zuletzt geprüft am 23.01.2014.

Blessing / Chakrabarti 2009

Blessing, L. T. ; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London : Springer, 2009.

Bonvoisin et al. 2010

Bonvoisin, J. ; Mathieux, F. ; Domingo, L. ; Brissaud, D.: Design for Energy Efficiency: Proposition of a Guidelines-based Tool. In: Marjanovic, D., Storga, M., Pavkovic, N. und Bojetic, N. (Hg.). *11th International Design Conference - DESIGN 2010: Proceedings* (Dubrovnik 2010). Zagreb, 2010, S. 629–638.

Börzel 1997

Börzel, T. A.: Zur (Ir-) Relevanz der Postmoderne für die Integrationsforschung. In: *Zeitschrift für Internationale Beziehungen* 1/1997 4 (1), 1997, S. 125–137.

Boulding 1981

Boulding, K. E.: *Evolutionary Economics* : Sage Publications, 1981.

Braun et al. 2013

Braun, A. ; Ebel, B. ; Albers, A.: Activity-Based Modeling and Analysis of Product Engineering Processes. In: Abramovici, M. und Stark, R. (Hg.). *23rd CIRP Design Conference: Smart Product Engineering* (Bochum 2013). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013.

Braun 2013

Braun, A.: Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM). Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2013.

Breiting / Knosala 1997

Breiting, A. ; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio : Springer, 1997.

Bundesministerium der Justiz 2004

Bundesministerium der Justiz: Verordnung über Verbraucherinformationen zu Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Stromverbrauch neuer Personenkraftwagen. Pkw-EnVkv (Stand 2011), 2004.

Bundesministerium der Justiz 2012

Bundesministerium der Justiz: Gesetz zur Kennzeichnung von energieverbrauchsrelevanten Produkten, Kraftfahrzeugen und Reifen mit Angaben über den Verbrauch an Energie und an anderen wichtigen Ressourcen. Energieverbrauchskennzeichnungsgesetz - EnVKG, 2012.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2008

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Förderdatenbank 2008. Online verfügbar unter <http://www.foerderdatenbank.de/Foerder-DB/Navigation/Foerderrecherche/suche.html?get=views;document&doc=7107>, zuletzt aktualisiert am 14.07.2011, zuletzt geprüft am 11.03.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Förderung von energiesparenden Technologien in Unternehmen. Berlin, 2013.

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. et al. 2008

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. ; Institut der Deutschen Wirtschaft Köln ; Roland Berger Strategy Consultants ; Vereinigung der Bayrischen Wirtschaft e.V.: Systemkopf Deutschland Plus – Die Zukunft der Wertschöpfung am Standort Deutschland. Berlin (BDI-Drucksache, 405), 2008.

Centre Urbain 2014

Centre Urbain: Appareils électroménagers & éclairage 2014. Online verfügbar unter <http://www.curbain.be/component/content/article/5-reglementations/123-appareils-electromenagers-a-eclairage#tableau>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.

Chakrabarti et al. 2004

Chakrabarti, A. ; Morgenstern, S. ; Knaab, H.: Identification and Application of Requirements and their Impact on the Design Process: A Protocol Study. In: *Research in Engineering Design* 15 (1), 2004, S. 22–39.

Cooper et al. 1998

Cooper, R. ; Wootton, A. B. ; Bruce, M.: Requirements Capture: Theory and Practice. In: *Technovation* 18 (8/9), 1998, S. 497–511.

Dena 2014

Dena, D. E.-A.: TopGeräte Datenbank 2014. Online verfügbar unter <http://www.stromeffizienz.de/private-verbraucher/onlinehilfen/topgeraete-datenbank.html>, zuletzt geprüft am 22.05.2014.

Deppert et al. 2001

Deppert, W. ; Mielke, D. ; Theobald, W.: Mensch und Wirtschaft - Interdisziplinäre Beiträge zur Wirtschafts- und Unternehmensethik. In: Deppert, W., Mielke, D. und Theobald, W. (Hg.): *Wirtschaft mit menschlichem Antlitz, Bd. 1*: Leipziger Universitätsverlag, 2001.

Design Society 2014

Design Society: The Design Society 2014. Online verfügbar unter <http://www.designsociety.org/about-ds>, zuletzt geprüft am 29.04.2014.

Deubel 2007

Deubel, T.: Anforderungs-, kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses. Saarbrücken, Universität des Saarlandes (Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD), Dissertation 2007.

Deutsches Institut für Normung e.V. 2003: Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten, DIN-Fachbericht ISO/TR 14062. Berlin : BeuthVerlag GmbH, 2003.

Diehl et al. 2006

Diehl, J. ; van Gennip, P. ; Mestre, A.: DESIGN GUIDELINES FOR RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES IN MOBILE PRODUCTS. In: Marjanović, D. (Hg.). *9th International Design Conference - DESIGN 2006: Proceedings* (Dubrovnik 2006): University of Zagreb, 2006, S. 1375–1381.

Diekmann et al. 1999

Diekmann, J. ; Eichhammer, W. ; Neubert, A. ; Rieke, H. ; Schlomann, B. ; Ziesing, H.-J.: Energie-Effizienz-Indikatoren. Statistische Grundlagen, theoretische Fundierung und Orientierungsbasis für die politische Praxis. Heidelberg : Physica-Verl (Umwelt und Ökonomie, 32), 1999.

Dings 2013

Dings, J.: Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality. Hg. v. Transport & Environment (T&E), European Federation for Transport and Environment AISBL. Brüssel, 2013.

DIN ISO 14040

DIN ISO 14040, 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

DIN ISO 14044

DIN ISO 14044, 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006) ; deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

Domingo et al. 2010

Domingo, L. ; Mathieux, F. ; Bonvoisin, J. ; Brissaud, D.: Indicator for in Use Energy Consumption (IUE): a tool enhancing Design for Energy Efficiency of products, IDMME-Virtual Concept, Bordeaux, France (2010). In: *IDMME-Virtual Concept: IDMME-Virtual Concept* (Bordeaux, France 2010), 2010.

Domingo et al. 2011

Domingo, L. ; Evrard, D. ; Mathieux, F. ; Moenne-Loccoz, G.: Synergico: a new "Design for Energy Efficiency" Method enhancing the Design of more environmentally friendly Electr(on)ic Equipments. In: Hesselbach, J. und Herrmann, C. (Hg.): *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Heidelberg [Germany]: Springer, 2011, S. 148–153.

Domingo et al. 2013

Domingo, L. ; Brissaud, D. ; Mathieux, F.: Implementing Scenario to better address the Use Phase in Product Ecodesign. In: Lindemann, U., Venkataraman, S., Kim, Y. S., Lee, S., Clarkson, J. und Cascini, G. (Hg.). *19th International Conference on Engineering Design - ICED 13: Design for Harmonies* (Seoul 2013): Design Society, 2013, S. 151–160.

Dorrer 2004

Dorrer, C.: Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen. Stuttgart, Universität Stuttgart (Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen), Dissertation, 2004.

Ehrlenspiel 2007

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Aufl. München, Wien : Carl Hanser, 2007.

Eiletz 1999

Eiletz, R.: Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte - am Beispiel PKW-Entwicklung. Aachen : Shaker, 1999.

Elias et al. 2007a

Elias, E. W. A. ; Dekoninck, E. A. ; Culley, S. J.: The Potential for Domestic Energy Savings through Assessing User Behaviour and Changes in Design. In: *International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing: EcoDesign* (Tokyo 2007) (5), 2007.

Elias et al. 2008

Elias, E. ; Dekoninck, E. ; Culley, S.: Assessing user behaviour for changes in the design of energy using domestic products. In: *International Symposium on Electronics and the Environment, ISEE*, Bd. 16 (San Francisco, CA, 2008), 2008.

Elias et al. 2009b

Elias, E. W. A. ; Dekoninck, E. A. ; Culley, S. J.: Designing for 'use phase' energy losses of domestic products. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (1), 2009, S. 115–120.

Enquete 1995

Enquete (Hg.): Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz : Schlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des 12. Deutschen Bundestages. Bonn (Schlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des 12. Deutschen Bundestages), 1995.

Erdmann / Zweifel 2008

Erdmann, G. ; Zweifel, P.: Energieökonomik: Theorie und Anwendungen : Springer, 2008.

Europäisches Parlament und der Rat der europäischen Union 2010

Europäisches Parlament und der Rat der europäischen Union: Richtlinie 2010/30/EU über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen. 2010/30/EU, vom 19.05.2010. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 153/1, 2010.

European Parliament and the Council of the European Union 2009

European Parliament and the Council of the European Union: Establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. 2009/125/EU. In: *Official Journal of the European Union* (L 285), S. 10–35, 2009.

Festo 2012

Festo: Effizienz ist berechenbar. In: *Konstruktion* (6), 2012, S. 28–29.

Förster et al. 2009

Förster, C. ; Hedrich, H. ; Schmid, J.: Benchmarking mit Radar-Charts und SMOP-Werten. Methodenoptimierung und Anwendung. In: *Wirtschaft und Politik*, Bd. 44, 2009.

Fritsche et al. 1999

Fritsche, U. ; Jenseit, W. ; Hochfeld, C.: Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwands (KEA). Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits, Institut für angewandte Ökologie e.V. (Öko-Institut). Darmstadt, 1999.

Gausemeier 2011

Gausemeier, J. (Hg.) : Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011.

Gausemeier et al. 2012

Gausemeier, J. ; Lanza, G. ; Lindemann, U.: Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren, 2012.

Gausemeier / Wiendahl 2011

Gausemeier, J. ; Wiendahl, H.-P.: Hebel zur Gestaltung von Produktentstehung, Produktion und Wertschöpfung in Deutschland. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen. In: Gausemeier, J. (Hg.): *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

Gehrke 2011

Gehrke, M.: Studie: Effizienzsteigerung in stromintensiven Industrien. Ausblick und Handlungsstrategien bis 2050, Roland Berger Strategy Consultants. München, 2011, 2011.

Geldermann 2008

Geldermann, J.: Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für Automatisierungsprojekte. Fraunhofer IPA. Stuttgart, 18.11.2008, 2008.

Goldmann / Schellens 1995

Goldmann, B. ; Schellens, J.: Betriebliche Umweltkennzahlen und ökologisches Benchmarking. In: *Wirtschaft und Umwelt*, Bd. 6, 1995.

Grabowski 2009

Grabowski, K.: Vom Verbrauchs-zum Effizienz-Controlling. Schritte zur Einführung eines Energieeffizienz-Controllings, Ökotec, 2009.

Guenther 2014

Guenther, E.: Kumulierter Energieaufwand (KEA). Gabler Wirtschaftslexikon. Hg. v. Springer Gabler Verlag 2014. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/222016/kumulierter-energieaufwand-kea-v7.html>.

Haberfellner et al. 2012

Haberfellner, R. ; Weck, O. de ; Fricke, E. ; Vössner, S.: Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 12., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Zürich : Orell Füssli, 2012.

Hall 1962

Hall, A. D.: A Methodology for Systems Engineering : van Nostrand, 1962.

Hansen 1968

Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre. Berlin : TEB Verlag Berlin, 1968.

Hennicke / Seifried 1996

Hennicke, P. ; Seifried, D.: Das Einsparkraftwerk. Eingesparte Energie neu nutzen. Berlin : Birkhäuser, 1996.

Herring / Roy 2007

Herring, H. ; Roy, R.: Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect. In: *Technovation* 27 (4), 2007, S. 194–203.

Höfner 2002

Höfner, T.: Nutzwertanalyse. Erweiterte Theorie und Einsatz, Skriptum zum Seminar Nutzwertanalyse am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.

Huber 2000

Huber, J.: Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung. In: Simonis, U. Ernst (Hg.): *Global Change VDW Jahrestagung*. Baden Baden: Nomos, 2000.

Ingeneer et al. 2012

Ingeneer, L. D. ; Mathieux, F. ; Brissaud, D.: A new 'in-use energy consumption' indicator for the design of energy-efficient electr(on)ics. In: *Journal of Engineering Design* 23 (3), 2012, S. 217–235.

Junge / Holzäpfel 2011

Junge, M. ; Holzäpfel, C.: Energieeffizienz bewerten. In: *ENERGIE-MANAGEMENT UND FACILITY MANAGEMENT*, 2011, S. 94–97.

Kaebnick et al. 2003

Kaebnick, H. ; Kara, S. ; Sun, M.: Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19 (6), 2003, S. 461–468.

KFW Bank 2014

KFW Bank: ERP Innovationsprogramm. Frankfurt am Main 2014. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Innovation/Finanzierungsangebote/ERP-Innovationsprogramm-%28180-185-190-195%29/#1>, zuletzt aktualisiert am 27.02.2014, zuletzt geprüft am 27.02.2014.

Klein 2009

Klein, M.: Die Conjoint-Analyse. Eine Einführung in das Verfahren mit einem Ausblick auf mögliche sozialwissenschaftliche Anwendungen, TU Freiberg (ZA-Information, 50), 2009.

Knie 2011

Knie, A.: Mobilität wird zunehmend rational. In: *VDI Nachrichten* (34), 2011.

Knight / Jenkins 2009

Knight, P. ; Jenkins, J. O.: Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. In: *Journal of Cleaner Production* 17 (5), 2009, S. 549–558.

Koch / Zech 2011

Koch, A. ; Zech, D.: Suffizienz, Effizienz, Konsistenz - Energienutzung in Haushalten. In: *Berliner Energietage*, 2011.

Konrad 2002

Konrad, W.: Produktbezogene Umweltinformationssysteme. Empirische Analysen zu ihrem Einsatz in Unternehmen. In: *Schriftenreihe des Instituts für Ökologische Wirtschaftsforschung*, Bd. 163. Berlin, 2002.

Kraushofer / Semmler 2003

Kraushofer, D. ; Semmler, M.: Einsatzmöglichkeiten des MIPS-Konzeptes und der Produktlinienanalyse zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von Produkten. Klagenfurt, Universität Klagenfurt (Institut für Wirtschaftswissenschaften), Hauptseminar, 2003.

Kruse 1996

Kruse, P. J.: Anforderungen in der interdisziplinären Systementwicklung: Erfassung, Aufbereitung, Bereitstellung. Clausthal, Techn. Univ, Dissertation, 1996.

Laux et al. 2012

Laux, H. ; Gillenkirch, R. M. ; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie : Springer Berlin Heidelberg, 2012.

Lindemann 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2009.

Linden et al. 2005

Linden, A.-L. ; Carlsson-Kanyama, A. ; Eriksson, B.: Efficient and inefficient aspects of residential energy behaviour: what are the policy instruments for change? In: *Energy Policy* 34, 2005, S. 1918–1927.

Löffler 2011

Löffler, T.: Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche. Abschlussbericht, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Technische Universität Leipzig, 2011.

Lohmeyer 2013

Lohmeyer, Q.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2013.

Lovins 2005

Lovins, A. B.: Energy End-Use Efficiency. In: Inter Academy Council (Hg.): *Transitions to Sustainable Energy Systems*. Amsterdam 2005.

Mamberer / Seider 2009

Mamberer, F. ; Seider, H.: Allgemeine Volkswirtschaftslehre. Berlin : TEIA-Internet-Akad., Lehrbuch-Verl 2009.

Martin et al. 2013

Martin, P. ; Albers, A. ; Ply, J.: Energy Efficiency as Design Objective using Utility-Based Indicators. In: Lindemann, U., Venkataraman, S., Kim, Y. S., Lee, S., Clarkson, J. und Cascini, G. (Hg.). *19th International Conference on Engineering Design - ICED 13: Design for Harmonies* (Seoul 2013): Design Society, 2013, S. 231–240.

Martin 2014

Martin, P. (25.03.2014): Anforderungen und Ziele im Projekt REM 2030. Interview mit dem Leiter der Forschungsgruppe "Systemische Mobilität" (Klingler, Simon). IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

Mayer 2012

Mayer, H. O.: Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung. 6. Aufl. München : Oldenbourg 2012.

Meboldt 2008

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2008.

Meerkamm 2007

Meerkamm, Harald (Hg.): Proceedings of 18. Symposium "Design for X". Symposium "Design for X". Neunkirchen, 11.12-12.12.2007, 2007.

Ministerium für Klima und Energiewirtschaft und Umwelt 2013

Ministerium für Klima und Energiewirtschaft und Umwelt (Hg.): Energieverbrauchsrelevante Produkte 2013. Online verfügbar unter <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/102696/>, zuletzt aktualisiert am 18.02.2013, zuletzt geprüft am 27.01.2014.

Moenne-Loccoz et al. 2010

Moenne-Loccoz, G. ; Trmblay, F. ; Saint-Ange, S. ; Domingo, L. ; Bonvoisin, J. :. Method and tools to meet energy efficiency targets at product design stage. In: *CARE INNOVATION 2010: 5th Going Green* (Wien, Österreich 2010), 2010.

Mosley / Mayer 1999

Mosley, H. ; Mayer, A.: Benchmarking national labour market performance. A radar chart approach., Working Paper 1999.

Müller et al. 2008

Müller, E. ; Engelmann, J. ; Strauch, J.: Energieeffizienz als Zielgröße in der Fabrikplanung. Energieeffizienzorientierte Planung von Produktionsanlagen am Beispiel der Automobilindustrie. In: *Werkstatttechnik online* 98 (7/8), 2008, S. 634–639.

Muschik 2011

Muschik, S.: Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering, Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2011.

Neely et al. 2005

Neely, A. ; Gregory, M. ; Platts, K.: Performance measurement system design: A literature review and research agenda. In: *International Journal of Operations & Production Management*, Bd. 25 2005, S. 1228–1263.

Neugebauer et al. 2009

Neugebauer, R. ; Friess, U. ; Paetzold, J. ; Wabner, M. ; Richter, M.: Approach for the Development of energy-efficient Machine Tools. In: *Journal of Machine Engineering* (2), 2009, S. 51–62.

Neuß 2008

Neuß, J.: Wahrnehmung und Relevanz von Diversity im Hinblick auf ökonomischen Mehrwert, Markt- und Innovationserfolg. 1. Aufl. s.l : GRIN Verlag 2008.

Newell / Siikamäki 2013

Newell, R. G. ; Siikamäki, J.: Nudging Energy Efficiency Behavior: The Role of Information Labels. Working Paper 19224, National Bureau of Economic Research. Cambridge 2013.

Oberschmidt 2010

Oberschmidt, J.: Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Göttingen, Georg-August-Universität Göttingen (Professur für Produktion und Logistik), Dissertation 2010.

Oerding 2009

Oerding, J.: Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2009.

Paech 2006

Paech, N.: Nachhaltigkeitsprinzipien jenseits des Drei-Säulen-Paradigmas. In: *Natur und Kultur* (7/1), 2006, S. 42–62.

Pahl et al. 2005

Pahl, G. ; Beitz, W. ; Feldhusen, J. ; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Berlin, Heidelberg : Springer 2005.

Pahl et al. 2007

Pahl, G. ; Beitz, W. ; Feldhusen, J. ; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung : Springer-Verlag 2007.

Patterson 1996

Patterson, M. G.: What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. In: *Energy Policy* 24 (5), 1996, S. 377–390.

Pehnt 2010

Pehnt, Martin (Hg.) (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14251-2>.

Pirker 2008

Pirker, F.: Energieeffizienz in der Mobilität – von Liter pro 100 km zu kWh pro 100 km. In: *Elektrotech. Inftech.* 125 (9), 2008, S. 319.

Rath et al. 2011a

Rath, K. ; Birkhofer, H. ; Bohn, A.: Which Guideline is most relevant? Introduction of a Pragmatic Design for Energy Efficiency Tool. In: Maier, A. M., Mougard, K., Howard, T. J. und McAlone, T. (Hg.). *18th International Conference on Engineering Design - ICED 11: Impacting Society through Engineering Design* (Kopenhagen 2011). Kopenhagen: Design Society, 2011, S. 236–248.

Rath et al. 2012b

Rath, K. ; Röder, B. ; Birkhofer, H. ; Bohn, A.: Standardized Requirements Acquisition through Clustering: A Tool for Energy-efficient Products. In: Marjanović, D., Storga, M., Pavkovic, N. und Bojčević, N. (Hg.). *12th International Design Conference 2012: Proceedings* (Dubrovnik 2012), 2012, S. 1081–1090.

Reichel et al. 2010

Reichel, T. ; Runger, G. ; Steger, D. ; Xu, H. (2010): IT-Unterstützung zur energiesensitiven Produktentwicklung. Hg. v. Fakultät für Informatik (Chemnitzer Informatik-Berichte, CSR-10-02), 2010.

Ropohl 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3. Aufl. Karlsruhe : Univ.-Verl. Karlsruhe, 2009.

Rose 2014

Rose, A.: Marktchance Energieeffizienz 2014. Online verfügbar unter <http://www.marktundmittelstand.de/nachrichten/kunden-maerkte/marktchance-energieeffizienz/>, zuletzt aktualisiert am 27.01.2014, zuletzt geprüft am 24.04.2014.

Runger et al. 2011

Runger, G. ; Götze, U. ; Putz, M. ; Bierer, A. ; Lorenz, S. ; Reichel, T. et al.: Development of energy-efficient products: Models, methods and IT support. In: *Energy-Efficient Product and Process Innovations in Production Engineering 4 (2)*, 2011, S. 216–224.

Santarius 2012

Santarius, T.: Der Rebound-Effekt. Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2012.

Schaal 2011

Schaal, S.: Wann sich ein Elektroauto lohnt. Hg. v. Handelsblatt Online 2011. Online verfügbar unter <http://www.handelsblatt.com/technologie/energie-umwelt/mobilitaet-der-zukunft/elektromobilitaet-wann-sich-ein-elektroauto-lohnt/4029720.html>, zuletzt geprüft am 03.03.2014.

Schmalenbach 2013

Schmalenbach, H.: Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2013.

Scholz / Tietje 2002

Scholz, R. W. ; Tietje, O.: Embedded case study methods. Integrating quantitative and qualitative knowledge. Thousand Oaks, California : Sage Publications 2002.

Schwarz 2013

Schwarz, A.: Integration von Messdaten in die Simulation zur multikriteriellen, zeiteffizienten versuchsbasierten Optimierung technischer Systeme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation, 2013.

Simunic 2001

Simunic, T.: Energy Efficient System Design and Utilization, Stanford University (Electrical Engineering), Dissertation 2001.

Stiftung Warentest 2011

Stiftung Warentest: Stromverbrauch Fernseher - Hersteller tricksen bei Energielabel - Meldung - Stiftung Warentest 2011. Online verfügbar unter <http://www.test.de/Stromverbrauch-Fernseher-Hersteller-tricksen-bei-Energielabel-4287310-0/>, zuletzt geprüft am 28.01.2014.

Stöber et al. 2007

Stöber, C. ; Faerber, M. ; Jochaud, F.: WISSENSORIENTIERTE PROZESSUNTERSTUTZUNG FÜR DFX-KRITERIEN. In: Meerkamm, H. (Hg.). *Symposium "Design for X": Proceedings of 18. Symposium "Design for X"* (Neunkirchen 2007), 2007, S. 33–42.

Stoeber et al.

Stoeber, C. ; Gruber, G. ; Krehmer, H. S. J. ; Westphal, C.: Herausforderung Design for X (DfX). In: *20. Symposium "Design for X" 2009*.

Sweeney et al. 2013

Sweeney, J. C. ; Kresling, J. ; Webb, D. ; Soutar, G. N. ; Mazzarol, T.: Energy saving behaviours: Development of a practice-based model. In: *Energy Policy* 61, 2013, S. 371–381.

Telenko / Seepersad 2010

Telenko, C. ; Seepersad, C. C.: A Methodology for Identifying Environmentally Conscious Guidelines for Product Design. In: *Journal of Mechanical Design* (132), 2010.

Thielmann et al.

Thielmann, A. ; Sauer, A. ; Isenmann, R. ; Wietschel, M.: Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Karlsruhe). Karlsruhe (Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI: Konzepte – Methoden – Praxisbeispiele).

Tichem 1997

Tichem, M.: A Design Coordination Approach to Design For X. Delft, Technische Universiteit Delft, Dissertation, 1997.

Tischner et al. 2000

Tischner, U. ; Schmincke, E. ; Rubik, F. ; Proesler, M.: Was ist EcoDesign. Basel : Birkhäuser 2000.

TU Dresden 2014

TU Dresden: Versuchsplanung - Wichtige Begriffe von A-Z - Operationalisierung. Hg. v. Technische Universität Dresden 2014. Online verfügbar unter <http://elearning.tu-dresden.de/versuchsplanung/e35/e287/e673>, zuletzt geprüft am 04.04.2014.

VDI 2221

VDI 2221, 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

VDI 4661

VDI 4661, 2003: Energiekenngrößen. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

VDI 2206

VDI 2206, 2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Verlag. Düsseldorf.

VDI 2223

VDI 2223, 2004: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

VDI 4608

VDI 4608, 2008: Energiesysteme. BeuthVerlag GmbH. Berlin.

VDI 4600

VDI 4600, 2012: Kumulierter Energieaufwand (KEA). BeuthVerlag GmbH. Berlin.

Vielhaber 2011

Vielhaber, M.: Entwicklung energieeffizienter Produkte, Universität des Saarlandes, 28.10.2011, 2011.

Weizsäcker 2014

Weizsäcker, R. K.: Bruttoinlandsprodukt (BIP). Gabler Wirtschaftslexikon. Hg. v. Springer Gabler Verlag 2014. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/bruttoinlandsprodukt-bip.html>.

Wieland 2013

Wieland, B. (: Mal A, mal C, mal E. In: *Autobild* (42), 2013.

Wikipedia 2014

Wikipedia (Hg.): Relevanz 2014. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/wiki/Relevanz>.

Wilkens et al. 2011

Wilkens, M. ; Drenkelfort, G. ; Dittmar, L.: Bewertung von Kennzahlen und Kennzahlensystemen zur Beschreibung der Energieeffizienz von Rechenzentren. In: *Schriftenreihe Innovationszentrum Energie*, Bd. 3 2011.

Wirtschaftsenzyklopädie 2014

Wirtschaftsenzyklopädie: Operationalisierbarkeit. Hg. v. Economia48 2014. Online verfügbar unter <http://www.economia48.com/deu/d/operationalisierbarkeit/operationalisierbarkeit.htm>, zuletzt aktualisiert am 28.10.2009, zuletzt geprüft am 07.04.2014.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH 2014

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (Hg.): Energiesuffizienz - Strategien und Instrumente für eine technische, systemische und kulturelle Transformation zur nachhaltigen Begrenzung des Energiebedarfs 2014. Online verfügbar unter <http://wupperinst.org/projekte/details/wi/p/s/pd/459/>, zuletzt geprüft am 10.01.2014.

Zangemeister 1976

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. München : Wittemannsche Buchhandlung 1976.

Zingel 2013

Zingel, C.: Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hg.)), Dissertation 2013.

Betreute studentische Abschlussarbeiten

Geiger 2013

Geiger, S.; Co-Betreuer: Martin, P.; Betreuer: Albers, A.: Eine Methode zur Systematisierung der Energieeffizienz als Zielgröße am Beispiel eines elektropneumatischen Schlagwerks. (Sperrvermerk bis Mai 2018). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Diplomarbeit, 2013.

HaCam 2014

HaCam, G.; Co-Betreuer: Martin, P.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung eines Werkzeugs zur differenzierten Betrachtung der Energieeffizienz als Zielgröße. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Masterthesis, 2014.

Lorenz 2014

Lorenz, P.; Co-Betreuer: Martin, P.; Betreuer: Albers, A.: Methode zur Systematisierung der Energieeffizienz am Beispiel der Optimierung eines Winkelbohrkopfs. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Masterthesis, 2014.

Ply 2013

Ply, J.; Co-Betreuer: Martin, P.; Betreuer: Albers, A.: Quantifizierung der Zielgröße Energieeffizienz anhand geeigneter nutzenbasierter Indikatoren. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Diplomarbeit, 2013.

Stadler 2012

Stadler, C.; Co-Betreuer: Martin, P.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung energieeffizienter Produkte - Einflussfaktoren & Methodeneinsatz. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Bachelorarbeit, 2012.

Weitere studentische Abschlussarbeiten

Kaufmann 2014

Kaufmann, J.; Co-Betreuer: Klingler, S.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung einer Methode zum Vergleich elektrifizierter Antriebstopologien hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionen. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Bachelorarbeit, 2014.

Lohmeyer 2007

Lohmeyer, Q; Co-Betreuer: Meboldt, M.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung eines Modells zur Darstellung von Zielsystemen und dessen Umsetzung am konzeptionellen Entwicklungsprozess eines von Hand geführten Diamantschleifgeräts. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Diplomarbeit, 2007.

Martin 2009

Martin, P.; Co-Betreuer: Lohmeyer, Q.; Betreuer: Albers, A.: Early Detection of Conflicts of Objectives by Developing Concept Ideas for Hammering Mechanisms. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Diplomarbeit, 2009.

12 Anhang

12.1 Fragebogen zur online Umfrage

Im Folgenden ist der vollständige Fragebogen dargestellt, der im Rahmen der empirischen Untersuchung der Energieeffizienz-Handhabung im industriepraktischen Umfeld mittels einer online-Umfrage verwendet wurde:

Allgemeine Angaben
Alter
Berufserfahrung
Branche Allg. Maschinen- und Anlagenbau Automotive (OEM) Automotive (Zulieferer) Energiesektor Handgeführte elektrische Geräte Haushaltsnahe Maschinen und Geräte Sonstiges
Ingenieursdomäne Mechanik Elektrik/Elektronik Mechatronik Gesamtsystem Sonstiges
Tätigkeitsbereich Entwicklungsingenieur Konstrukteur Gruppenleiter / Abteilungsleiter Projektmanager Produktmanager Versuch / Testing Marketing Sonstiges

Umfang der Erfahrung mit Energieeffizienz als Zielgröße				
Anzahl Projekte mit Energieeffizienz als Ziel				
0				
1-3				
3-5				
5-10				
>10				
Anzahl Projekte mit persönlicher Berücksichtigung der Energieeffizienz als Ziel				
0				
1-3				
3-5				
5-10				
>10				
Erfahrungen mit der Handhabung der Zielgröße Energieeffizienz	Stimme voll zu; entspricht meinen Erfahrungen	Stimme eher zu	Stimme eher nicht zu	Stimme nicht zu; entspricht überhaupt nicht meinen Erfahrungen.
Umgang mit Energieeffizienz als Zielgröße				
Die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolgt nicht-standardisiert.				
Die Handhabung der Energieeffizienz als Zielgröße erfolgt ohne methodische Hilfsmittel.				
Es ist Aufgabe des Entwicklers, die Zielgröße Energieeffizienz im Projektkontext richtig zu verstehen und zu formulieren				
Berücksichtigung der Wichtigkeit der Energieeffizienz				
Die Wichtigkeit der Energieeffizienz lässt sich vergleichend mit der Wichtigkeit anderer Ziele bewerten.				
Die Wichtigkeit der Energieeffizienz lässt sich vergleichend zu ihrer Wichtigkeit in früheren Projekten bewerten.				

<p>Zu Projektbeginn findet eine Bewertung der Wichtigkeit der Energieeffizienz statt.</p> <p>Diese Bewertung wird im weiteren Projektverlauf häufig erheblich korrigiert.</p> <p>Die tatsächliche (Un-) Wichtigkeit der Energieeffizienz wird häufig erst während der Projektbearbeitung erkannt.</p>				
<p>Berücksichtigung des Potenzials der Energieeffizienz</p>				
<p>Zu Projektbeginn wird das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz explizit untersucht</p> <p>Das Potenzial der Energieeffizienz wird bei der Priorisierung der EE-Ziele berücksichtigt.</p> <p>Das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz wird technisch bewertet.</p> <p>Das Potenzial bzgl. der Energieeffizienz wird wirtschaftlich bewertet.</p>				
<p>Formulierung der Zielgröße</p>				
<p>Die Zielgröße Energieeffizienz ist messbar und damit eindeutig auf Zielerreichung überprüfbar.</p> <p>Die Formulierung der Zielsetzung bzgl. Energieeffizienz ist gut verständlich.</p> <p>Die Formulierung fördert ein zielführendes Verständnis der Energieeffizienz für die Entwicklungsaufgabe.</p> <p>Ziele bzgl. Energieeffizienz werden häufig nur qualitativ beschrieben.</p> <p>Die Energieeffizienz wird meist mithilfe des energetischen Wirkungsgrads beschrieben.</p> <p>Mit den Energieeffizienz-Zielen werden auch die zu berücksichtigenden Systemgrenzen explizit geklärt.</p>				

Motive für die Energieeffizienz als Zielgröße			
Welche Aspekte sollen berücksichtigt werden?	ja	unsicher	nein
Ökologische Aspekte (Energieaufwand, Energieart, Emissionen,...)			
Wirtschaftliche Aspekte (Energiekosten)			
Technische oder funktionale Aspekte (Leistungsgrenzen der Energiequelle oder des Anwenders, begrenzte Leistungsverfügbarkeit, thermische Belastungsgrenzen durch Abwärme,...)			
Mobilität (Reichweite/ Kapazität/ Transportierbarkeit des Energieespeichers, ...)			
Außendarstellung des Unternehmens (Marketing, Verwendung von Energieeffizienz-Labels, ...)			
Rechtliche Aspekte (verpflichtende Labels, EU- Richtlinien, ...)			
Förderungen (finanzielle Förderungen von Bund oder EU, vergünstigte Kredite, ...)			
Weitere Aspekte?			

12.2 Basissatz an Fragen zur Systematisierung

Tabelle 10: Basissatz an Fragen zur Ermittlung der projektspezifischen Relevanz der Energieeffizienz als Zielgröße

1 Soll das Produkt durch einen mobilen Speicher mit Energie versorgt werden?	Ja
	Nein
1.1 Wie lange/weit soll der Energiespeicher halten?	Kurz
	Mittel
	Lang
1.1.1 Soll es möglich sein, den Energiespeicher zu füllen/aufzuladen oder auszutauschen?	Füllen/Aufladen
	Tauschen
	Beides
	Nein
1.1.1.1 Wie lange darf es dauern, den Energiespeicher zu laden/füllen?	Kurz
	Mittel
	Lang
1.1.1.2 Wie hoch darf der Aufwand für den Transport zusätzlicher Energiespeicher sein?	Hoch
	Mittel
	Niedrig
1.1.1.3 Wird die Lebensdauer des Produktes durch die zur Verfügung stehende Energiemenge bestimmt?	Ja
	Nein
1.1.1.1.1 Wie gut ist die Infrastruktur (Stromnetz zum Laden, Tankstellen, etc.) am Einsatzort ausgebaut?	Schlecht
	Mittel
	Gut
1.2 Wie viel Einfluss wird das Gewicht des Produkts auf dessen Energiebedarf haben?	Hoch
	Mittel
	Gering
	Keinen
2.1 Welche Energieform soll als Energiequelle verwendet werden?	Elektrizität
	Wasserstoff
	Biogene Brennstoffe
	Fossile Brennstoffe
2.2 Wird ohne Kühlung eine störende Wärme als Nebeneffekt erzeugt?	Ja
	Nein
2.3 Erfordert diese Wärme eine Verwendung spezieller Werkstoffe?	Ja
	Nein
2.4 Wird das Produkt eine thermische Regulierung (Kühlung, Heizung) benötigen?	Passiv
	Aktiv
	Nein
2.5 Ist eine Leistungssteigerung gefordert?	Ja
	Nein
2.6 Kann die Energiequelle mehr Leistung liefern?	Ja
	Nein

2.7 Wird Downsizing angestrebt?	Ja
	Nein
3.1 Soll der Käufer des Produktes die durch den Energieverbrauch verursachten Betriebskosten tragen?	Ja
	Nein
3.1.1 Wie hoch soll der Anschaffungspreis sein?	
3.2 Gibt es Förderungen bezüglich Energieeffizienz die das Unternehmen in Anspruch nehmen könnte?	Ja
	Nein
3.3.1 Werden die Voraussetzungen erfüllt oder können mit überschaubarem Aufwand erreicht werden?	Ja
	Nein
4. Gibt es Gesetze oder Verordnungen bezüglich Energieeffizienz oder Ökologie die das Produkt betreffen?	EnVKV oder Öko-Design RL
	Beides
	Andere
	Nein
5. Gibt es Gütesiegel die dem Produkt ein positives Image verleihen?	Ja
	Nein
5.1 Soll der Kunde durch eine CO2-Bilanz o. Ä. über die Umweltverträglichkeit des Produktes informiert werden?	Ja
	Nein
5.1.1 Gibt es Vorgaben vom Marketing das Produkt energieeffizient zu gestalten?	Ja
	Nein
6 Soll der Anwender in irgendeiner Form Kraft aufbringen, um das Produkt zu benutzen?	Ja
	Nein
6.1 Wie viel Einfluss wird das Gewicht des Produktes auf den Energiebedarf des Anwenders haben?	Hoch
	Mittel
	Gering
	Keinen
6.1.1 Wie hoch wird die physische Belastung des Anwenders sein?	Hoch
	Erhöht
	Mittel
	Gering

12.3 Weiterführende Hinweise im Softwaretool

Bedingungen	Betroffene Motive	Hinweise und Empfehlungen
Gesamte Relevanz >66%	Energieeffizienz	Die Energieeffizienz scheint eine für das zu entwickelnde Produkt sehr relevante Zielgröße zu sein. In Abhängigkeit des technischen Potenzials einer Energieeffizienzsteigerung kann damit ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial verbunden sein. Entsprechend sollte die Zielgröße möglichst differenziert berücksichtigt und verfolgt werden.
33%<Gesamte Relevanz <66%	Energieeffizienz	Die Energieeffizienz scheint eine für das zu entwickelnde Produkt prinzipiell relevante Zielgröße zu sein. In Abhängigkeit des technischen Potenzials einer Energieeffizienzsteigerung kann damit ein Wertschöpfungspotenzial verbunden sein. Dieses sollte näher bewertet werden, um die Zielpriorisierung entsprechend anzupassen. Die Zielgröße sollte möglichst differenziert berücksichtigt und verfolgt werden.
Gesamte Relevanz <33%	Energieeffizienz	Die Energieeffizienz scheint für das zu entwickelnde Produkt nicht besonders relevant zu sein. Wenn nicht gerade ein außergewöhnlich hohes technisches Potenzial einer Energieeffizienzsteigerung besteht, sollte das Ziel entsprechend gering priorisiert und Ressourcen anderweitig fokussiert werden. (Bitte Überprüfen Sie zunächst, ob etwa andere, nicht abgefragte Motive dennoch die Energieeffizienz als Ziel wichtig erscheinen lassen.)
Hauptmotiv: Mobilität	Mobilität	Ein Hauptmotiv ist die Mobilität. Suchen und unterstützen Sie Maßnahmen, die dem Produkt eine höhere Mobilität bieten (Reichweite, Energie sparen, hoher Wirkungsgrad, usw.). Hierbei ist im Wesentlichen die lokale Energieeffizienz interessant. Entsprechend können ggf. höhere Betriebskosten und/oder negative ökologische Auswirkungen in Kauf genommen werden. Häufig bietet die gezielte Berücksichtigung des Anwenderverhaltens bzw. dessen Steuerung eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung. Fokussierung der Nutzungsphase.
Hauptmotiv: Ökologie	Ökologie	Ein Hauptmotiv ist die Ökologie. Daher ist der gesamte Produktlebenszyklus hinsichtlich der Energieeffizienz und anderer ökologischer Auswirkungen zu berücksichtigen. Da dieses Werkzeug aktuell jedoch die Nutzungsphase fokussiert, kann die tatsächliche Relevanz von der ermittelten abweichen. Methoden wie LCA und KEA könnten für die Bestimmung der ökologischen Aspekte interessant sein. Zunächst sollte jedoch kritisch hinterfragt werden, ob

		ökologische Motive tatsächlich in dieser Höhe bestehen, und die eigentlichen Beweggründe nicht eher ökonomischen und außendarstellungsbezogenen Ursprungs sind.
Hauptmotiv: Betriebskosten	Betriebskosten	<p>Ein Hauptmotiv sind die Betriebskosten. Bei entsprechendem Wertschöpfungspotenzial sollte eine gezielte Steigerung der Energieeffizienz genutzt werden, um die kundenseitig verringerten energetischen Betriebskosten für eine höhere Marge oder Wettbewerbsdifferenzierung zu verwenden. Durch gesteigerte Energieeffizienz ermöglichte verringerte energetische Betriebskosten sollten auch für die Außendarstellung von Produkt und Unternehmen genutzt werden.</p> <p>Ein Ansatz zur Effizienzsteigerung könnte auch die Verwendung günstigerer Energieformen oder die Verwendung freier Energie (Energy-Harvesting, etc.) sein.</p> <p>Gegebenenfalls sind die für eine Effizienzsteigerung erhöhten Entwicklungs- und Herstellungskosten mit den potenziellen Mehreinnahmen zu die Steigerung gegen zu rechnen.</p> <p>Formulierung von Energieeffizienzzielen unter Berücksichtigung der Betriebskostenauswirkungen</p> <p>Fokussierung der Nutzungsphase.</p>
Hauptmotiv: Gesetze	Gesetze	<p>Ein Hauptmotiv ist die Einhaltung gesetzlicher Bestimmungen. Zunächst sollten detaillierte Informationen zu den betroffenen Verordnungen ermittelt werden. Falls eine Umgehung der Bestimmungen nicht möglich ist, sollte die notwendige Energieeffizienzsteigerung so gut wie möglich auch für eine Verbesserung des Produkts sowie ein entsprechendes Marketing genutzt werden.</p> <p>Fokussierung der Nutzungsphase, evtl. aber auch Berücksichtigung der Herstellung und der Entsorgung.</p>
Hauptmotiv: Förderungen	Förderungen	<p>Ein Hauptmotiv sind finanzielle Förderungen. Das damit verknüpfte Wertschöpfungspotenzial hängt stark von den Förderbedingungen ab, die das Unternehmen mit vertretbarem Aufwand erfüllen kann.</p> <p>Fokussierung der Herstellung, der Nutzungsphase und der Entsorgung.</p>
Hauptmotiv: Image/ Marketing	Marketing	<p>Ein Hauptmotiv ist die Außendarstellung. Die Energieeffizienz stellt ein sehr wichtiges Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb dar. Daher sollte man tatsächliche Energieeffizienzsteigerungen entsprechend extensiv vermarkten (Marketing frühzeitig einbinden!) oder im Falle geringerer Gesamtrelevanz der Energieeffizienz den tatsächlichen Entwicklungsaufwand begrenzen bzw.</p>

		<p>anderweitig fokussieren und eine vermeintliche Energieeffizienzsteigerung durch geeignete positiv wirkende Kennzahlen, Vergleiche oder angepasste Referenzzyklen erzielen.</p> <p>Fokussierung der Nutzungsphase, aber ggf. auch der Herstellung, und/oder der Entsorgung.</p>
Hauptmotiv: Technik	Technik	<p>Ein Hauptmotiv sind Technik und Funktionserfüllung. Eine Steigerung der Energieeffizienz kann für eine überverhältnismäßige Leistungserhöhung des Produkts genutzt werden. Die Effizienzsteigerung kann beispielsweise durch Downsizing erreicht werden. Es sollte überprüft werden, inwiefern eine Effizienzsteigerung die Verwendung kleinerer Kühlsysteme, kostengünstigerer (weil thermisch geringer belastbarer) Materialien oder die Entlastung des Anwenders ermöglichen.</p> <p>Hierbei ist kritisch zu hinterfragen, in welchem Verhältnis das technische Potenzial einer Effizienzsteigerung zu dem beim Kunden erzielten (ergonomische, ökonomischen, oder funktionalen, etc.) Mehrwert steht. Entsprechend der angestrebten Nutzenverbesserung sollte die Formulierung der Effizienzziele erfolgen.</p> <p>Fokussierung der Nutzungsphase.</p>
Hauptmotiv: Ergonomie	Ergonomie	<p>Ein Hauptmotiv ist die Ergonomie. Daher sollte eine produktintrinsic Effizienzsteigerung nicht auf Kosten eines zusätzlichen Anwenderenergieaufwands erfolgen. Ggf. kann die notwendige Anwenderenergie durch eine produktseitige Leistungserhöhung reduziert werden. Die einschlägigen Leitfäden zur ergonomischen Produktverwendung sind zu beachten. Eine Energieeffizienzsteigerung kann auch im ergonomischen Sinne für die Außendarstellung des Produkts oder der Marke genutzt werden.</p> <p>Fokussierung der Nutzungsphase.</p>
Hauptmotiv: Betriebskosten ODER Mobilität ODER Technik		<p>Fokussierung der Produktnutzungsphase (Auswahl passender Guidelines nach Rath et al. oder Gestaltungsrichtlinien nach Telenko/Seepersac und Bonvoisin et al.)</p>
Hauptmotiv: Betriebskosten ODER Mobilität ODER Technik		<p>Einfluss des Anwenderverhaltens / der Betriebsstrategie auf die Energieeffizienz untersuchen und ggf. gezielt fördern.</p>

1 Ja + 1.2 Hoch/Mittel	Mobilität	<p>Der Energiespeicher hat meistens einen relativ hohen Anteil am Gesamtgewicht des Produkts und das Gewicht hat einen Einfluss auf dessen Energiebedarf. Je größer der Speicher, desto höher der Energieverbrauch. Möglichkeiten zur Lösung dieses Konflikts können Leichtbau-Gestaltung, die Wahl einer alternativen Energieform oder die Verbesserung der Energie-Infrastruktur zugunsten kleinerer Speicher sein.</p> <p>In jedem Fall ist diese Problematik bei gegebener hoher Gesamtrelevanz der Energieeffizienz bereits bei den Aktivitäten der Profilfindung oder spätestens der Ideenfindung zu berücksichtigen.</p>
1.1.1 Füllen/Aufladen + 1.1.1.1 Kurz	Mobilität	<p>Der Energiespeicher sollte schnell aufgeladen bzw. nachgefüllt werden. Um Zeit zu sparen oder ein höhere Reichweite zu ermöglichen, kann ein auswechselbarer Energiespeicher (bzw. Range-Extender) interessant sein. Ist es evtl. möglich die Verfügbarkeit der Infrastruktur zu verbessern bzw. eine alternative Energieform zu verwenden?</p>
1.1.1.2 Niedrig	Mobilität	<p>Der Transport zusätzlicher Energiespeicher scheint aufwendig, sodass diese in der Regel nicht für einen schnellen Ersatz mitgeführt werden (können). Die Reichweite des Produkts hängt von der Kapazität eines einzelnen Speichers ab. Die geforderte Energieeffizienz wird hier maßgeblich von der geforderten Reichweite bestimmt. Evtl. können kleinere Energiespeichereinheiten</p>
1.1.1.3 Ja	Mobilität Technik	<p>+ Die Lebensdauer des Produktes wird durch die zur Verfügung stehende Energiemenge bestimmt. Eine Verbesserung bietet hohes Differenzierungspotenzial. Unnötige Energieverbrauchsursachen (Zusatzgewicht, zusätzliche Komponenten, usw.) sind zu vermeiden, bzw. zumindest während der Nichtnutzung des Produkts auf ein Minimum zu reduzieren (Standby/off). Für eine ökologische Außendarstellung muss das Produktprofil kritisch betrachtet werden. Ggf. könnte eine Variante des Produkts (für nachhaltigkeitsbewusste Kunden) einen aufladbaren/austauschbaren Energiespeicher bieten.</p>
1.1.1.3 Ja	Ökologie	<p>Sie betrachten ein Einweg-Produkt. Entsprechend gilt es auch Aktivitäten wie Entsorgung, Recycling, Demontage zu betrachten.</p>
1.2 Hoch/Mittel + 3.1 Ja	Betriebskosten	<p>Das Gewicht des Produkts beeinflusst den Energieverbrauch, dessen Kosten der Anwender trägt. Bei gegebener Kostenrelevanz: Steigerungen der Energieeffizienz (bspw. durch Leichtbaumaßnahmen) können monetär bewertet und bei der Preiskalkulation berücksichtigt werden (frühe Einbindung Marketing!).</p>

KW>10	Betriebskosten	Die energetischen Betriebskosten betragen mehr als ein Zehnfaches der Anschaffungskosten. Dies ist ein außergewöhnlich hohes Verhältnis. Entsprechend ist die Kalkulation kritisch zu hinterfragen. Mit einer Steigerung der Energieeffizienz können die energetischen Betriebskosten direkt und maßgeblich beeinflusst werden. Damit wird die Energieeffizienz des Produkts auch hier ein starkes Differenzierungsmerkmal (Marketing!).
6.1 Nein	Förderung	Die Voraussetzungen für eine Förderung werden nicht oder nicht mit vertretbarem Aufwand erfüllt. Es kann trotzdem wirtschaftlich interessant sein, das Produkt weiter zu entwickeln, bis Sie die Förderungen beziehen können.
2 Energiequelle + 3.2 Ja	Förderungen + Technik	Förderungen sind häufig an die verwendete Energieform gebunden. Wenn möglich sollte dies bei der Wahl der Energieform wirtschaftlich berücksichtigt werden.
3 Ja + 5 Ja	Marketing + Betriebskosten	Gütesiegel, wie z.B. der Energy-Star, implizieren günstige Betriebskosten. Der Anschaffungspreis kann höher sein, falls es rentabel für den Kunden bleibt. Gezielt entsprechende Label verwenden.
1.1.1.3 Ja + 3.1.1 Preis	Marketing + Technik	Wenn die Lebensdauer des Produktes durch die zur Verfügung stehende Energiemenge bestimmt wird, hat die Energieeffizienz auch einen Einfluss auf den Anschaffungspreis. Hierbei sind die Berücksichtigung der Wettbewerbsfähigkeit (horizontal und vertikal) und die „Reichweite“ des Produkts besonders wichtig.
1.1.1.1 Kurz + 1.1.1.1.1 Gut + 1.2 Hoch	Technik + Downsizing	Wenn die Infrastruktur gut ausgebaut ist, der Energiespeicher schnell gefüllt ist und der Einfluss des Produktgewichts auf dessen Energiebedarf groß ist, könnte die Verwendung kleinerer, leichterener Energiespeichereinheiten und evtl. kombinierte Downsizing-Maßnahmen interessant sein.
2.5 Ja + 2.6 Ja	Technik	Eine Leistungssteigerung ist gefordert aber die Energiequelle ist bereits ausgereizt. Hierfür ist eine Steigerung der Energieeffizienz (im Sinne des energetischen Wirkungsgrads) die einzige direkte Lösung. Mittels einer Analyse des tatsächlichen Nutzungsprofils sollte untersucht werden ob es nicht evtl. ausreicht die Maximalleistung nur temporär bereitzustellen („Boost-Funktion“) und hierfür Zwischenspeicher zu verwenden (Kondensator, Feder, Schwungmasse,...)
2.3 Ja oder 2.4 Aktiv	Technik	Die thermische Verlustenergie erfordert die Verwendung spezieller Werkstoffe oder einer aktiven Kühlung. Dies verursacht in der Regel höhere Herstellungs- oder Betriebskosten. Falls das Produkt mit mehreren energieumsetzenden Komponenten ausgestattet ist, könnte

		das Systemarchitektur (Layout) ggf. unter thermischen Gesichtspunkten optimiert werden. Es sollte eine technisch-wirtschaftliche Betrachtung des Trade-Offs Kühlung vs. thermisch hochfester Werkstoffe stattfinden.
2.7 Nein + 1.1 Lang	Technik	Downsizing wird aktuell nicht angestrebt, obwohl eine lange Reichweite des Produkts gewünscht ist. Wäre es möglich den Verbrauch zu reduzieren, ohne die Endleistung zu vermindern bzw. die Leistungsbereitstellung an die tatsächlichen Bedarfe anzupassen? Die Reichweite könnte ggf. durch Leichtbaumaßnahmen, höhere Speicherkapazitäten oder ggf. alternative Energieformen gesteigert werden.
2.5 Ja + 2.7 nein	Technik	Energieeffizienzsteigerung evtl. über Masse/Bauraumfreiheit möglich?
6.1 Hoch/Mittel + 2.4 Aktiv/Passiv	Ergonomie	Das Produktgewicht beeinflusst die Anwender-Ergonomie und das Produkt ist mit einem Kühlsystem ausgestattet. Daher ist das Kühlsystem in seiner Notwendigkeit zu hinterfragen bzw. so leicht wie möglich zu gestalten.
6.1 Hoch/Mittel + 2.4 Aktiv/Passiv + 1 Ja	Ergonomie + Mobilität	Das Produktgewicht beeinflusst die Anwender-Ergonomie. Energiespeicher und Kühlsystem sind häufig erhebliche Gewichtstreiber. Steigerungen der Energieeffizienz ermöglichen sowohl eine Reduktion der notwendigen Speichergröße (bei gleichbleibender Reichweite) als auch der notwendigen Kühlleistung. Energieeffizienzziele sollten entsprechend formuliert werden und Marketing-seitig genutzt werden.
6.1.1 Gering	Ergonomie	Der Anwender benötigt wenig Kraft für die Verwendung des Produkts. Wenn ergonomisch unbedenklich und für das Kundenempfinden nicht nachteilig, kann ein zusätzlicher Energieaufwand seitens des Anwenders in Erwägung gezogen werden (bsp. Automatik-Uhr).

12.4 Interview-Leitfaden zur Validierungsstudie „Winkelbohrkopf und Bohrhammer“

Der Leitfaden für die geführten Interviews wurde im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit von LORENZ entworfen.⁴¹⁸

1 Einführung (erstes Interview)

- Organisatorisches (folgende Punkte werden dem Probanden erläutert)
 - o Kurz Thema/Zweck der Befragung,
 - o geschätzter Zeitaufwand
 - o Ablauf Befragung
- Fragen zu Projekt/Methode (Nachfragen möglich)
 - o *Was verstehst du unter Energieeffizienz?*
 - o *Warum kann Energieeffizienz wichtig sein?*
 - o *Wo/wann war Energieeffizienz ein Thema /Warum?*
 - o *War das von Anfang an klar?*
 - *(Wenn nein)*
 - *Ergaben sich im Verlauf dadurch weitere Probleme?*
 - *Wie wurden diese Probleme gelöst?*
 - *Wurde der Lösungsweg dokumentiert?*
 - *(Wenn ja)*
 - *Wie wurde festgelegt, dass es sich um ein Ziel handelt?*
 - *Werden Ziele allgemein so festgelegt?*

2 Benutzung des Tools

- Aufbau Werkzeug erklären
- Anforderungen an Probanden
 - o Proband soll sich in die Situation versetzen, dass er am Anfang des Projektes steht
 - o Er soll nur die Ziele angeben, die auch wirklich zu Projektbeginn vorhanden waren
 - o Um lautes Denken bitten
 - o Proband darf gerne ansprechen bei welchen Fragen er Probleme hat
 - o Bei der eigentlichen Befragung keine Hilfestellung geben

3 Interview

- Dem Probanden die Auswertung erklären
 - o *Probanden bitten, bei Unklarheiten nachzufragen*
- Fragen zu Werkzeug und Methode
 - o *Waren die Fragen verständlich?*
 - o *Sequentieller Aufbau hilfreich?*
 - o *War die Auswertung nachvollziehbar?*
 - *Einteilung in Motive*
 - *Relevanzbewertung*
 - *Empfehlungen*
 - *Abgeleitete Betrachtungsräume*
 - o *Wie findest du die Anwendbarkeit des WZ insgesamt?*

⁴¹⁸ Aus Lorenz 2014 (betreute Abschlussarbeit), Anhang S.V

- *Siehst du durch die Nutzung einen Mehrwert für Projekte?*
 - *Kann so etwas in ein Projekt einbezogen werden?*

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Paul Martin
Geburtsdatum: 06. September 1982
Geburtsort: Freiburg, i.Br.
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Familienstand: verheiratet

Bildungsgang

1989 – 1993 Michael Friedrich Wild Grundschule
1993 – 2002 Markgräfler Gymnasium Müllheim (Abschluss: Allgemeine Hochschulreife)
2002 – 2003 Wehrdienst in der Fernspähkompanie 200.
2003 – 2009 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Produktentwicklung und Konstruktion am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und am Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm. (Abschluss: Diplom)
2005 – 2006 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung; am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
2008 Praktikum bei der Hilti Entwicklungsgesellschaft, Kaufering im Bereich der technischen Produktentwicklung
2009 Praktikum und Diplomarbeit bei Hilti Asia Development and Supply in den Bereichen Vorentwicklung und Sourcing

Berufstätigkeit

seit 03/2010 Akademischer Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
seit 07/2011 Leiter der Forschungsgruppe Condition Monitoring am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)