

VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 20: Ressourceneffizienz durch Maßnahmen in der Produktentwicklung

Autoren:

Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
Dr.-Ing. Christof Oberender, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Tom Buchert, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © Jennewein Photo/Fotolia.com

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 20

Ressourceneffizienz durch Maßnahmen in
der Produktentwicklung

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	5
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	10
2 EINBINDUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IN DIE PRODUKTENTWICKLUNG	12
2.1 Der klassische und der integrierte Prozess der Produktentwicklung	12
2.1.1 Ressourceneffizienz-Aspekte beim Klären der Aufgabe	16
2.1.2 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Konzeptphase	17
2.1.3 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Entwurfsphase	17
2.1.4 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Ausarbeitung	18
2.2 Ressourceneffizienz durch eine umfassende Betrachtung des Produktlebenswegs	19
2.3 Innovationsstufen zur Steigerung der Ressourceneffizienz eines Produkts	22
3 RESSOURCENEFFIZIENZ-MAßNAHMEN IM PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESS	25
3.1 Ressourceneffizienz durch die Kombination von Produkt und Service	27
3.2 Ressourcengerechte Produktentwicklung und konkrete Ressourceneffizienz-Maßnahmen	30
3.2.1 Fertigungsgerechte Produktgestaltung	32
3.2.2 Demontage- und reparaturgerechte Produktgestaltung	33
3.2.3 Werkstoff-/materialgerechte Produktgestaltung	35
3.2.4 Funktions- und nutzungsgerechte Produktgestaltung	36
3.2.5 Recycling- und entsorgungsgerechte Produktgestaltung	37
3.2.6 Praxisbeispiele	38
3.3 Methoden und Tools zur Bewertung der Ressourceneffizienz	41

3.3.1	Lebenswegbewertung der Ressourceneffizienz	42
3.3.2	Bewertung der Ressourceneffizienz innerhalb der Grenzen des Produktentwicklungsprozesses	53
4	NORMEN UND RICHTLINIEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER PRODUKTENTWICKLUNG	60
4.1	Normen und Richtlinien für die ganzheitliche Bewertung	61
4.2	Normen und Richtlinien für den Produktentwicklungsprozess	62
4.3	Normen und Richtlinien zum Klären der Aufgabe	63
4.4	Normen und Richtlinien für die Konzept- und Entwurfsphase	64
4.5	Normen und Richtlinien für die Ausarbeitungsphase	64
5	PRODUKTDEKLARATION UND BESCHAFFUNG	66
6	FAZIT	69
	LITERATURVERZEICHNIS	71
	ANHANG	79

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vorgehensweise des klassischen Produktentwicklungsprozesses	13
Abbildung 2: Vorgehensweise des integrierten Produktentwicklungsprozesses	14
Abbildung 3: Elemente einer integrierten Produktentwicklung	15
Abbildung 4: Integrierte Produktentwicklung mit ganzheitlicher Bewertung	20
Abbildung 5: Innovationsstufen/Systemebenen	22
Abbildung 6: Ressourceneffizienz-Strategien und Bewertungsmethoden	26
Abbildung 7: Drei Kategorien von Produkt-Service-Systemen	27
Abbildung 8: Schematisches Modell des Chemikalienleasings	29
Abbildung 9: Verknüpfung von Design for X-Strategien und Ökodesign-Prinzipien (Herleitung im Anhang)	31
Abbildung 10: Vergleich des Aufbaus von LED-Lampen (links: vier herkömmliche LED-Lampen; rechts: LED-Lampe der Firma Seidel GmbH)	39
Abbildung 11: Methoden und Tools zur Bewertung der Ressourceneffizienz	41
Abbildung 12: Beispiel: Kumulierter Rohstoffaufwand von Energiespeichertechnologien	42
Abbildung 13: Beispiel: Kumulierter Energieaufwand von Energiespeichertechnologien	44
Abbildung 14: Drei Kategorien und 13 Kriterien der Rohstoffkritikalitätsbewertung	45
Abbildung 15: Wertebereich zur Bewertung der Rohstoffkritikalität	45

Abbildung 16: Beispiel: Treibhausgaspotenzial von Energiespeichertechnologien	47
Abbildung 17: Kennzahlen als Ergebnis des Eco-Indicator99	48
Abbildung 18: Beispielhafte Ergebnisdarstellung der Ökoeffizienz-Analyse	51
Abbildung 19: Ablauf einer Ressourcen-FMEA	55
Abbildung 20: Ablauf einer ressourcenorientierten Funktionsträger-Analyse	57
Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Funktionsträger-Analyse	58
Abbildung 22: Kapitelübersicht zu Normen und Richtlinien	60
Abbildung 23: Neun Grundsätze der produktbezogenen Umweltkennzeichnung	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Reichweite der Einflussnahme über die Produktentwicklung	21
Tabelle 2:	Umweltwirkungen von Produkt-Service-Systemen	30
Tabelle 3:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Kumulierten Rohstoffaufwands	43
Tabelle 4:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Kumulierten Energieaufwands	44
Tabelle 5:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Rohstoffkritikalität	46
Tabelle 6:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Ökobilanz	47
Tabelle 7:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Eco-Indicator99	48
Tabelle 8:	MET-Matrix	49
Tabelle 9:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der MET-Matrix	50
Tabelle 10:	Untersuchungskriterien aus den Bereichen Natur, Gesellschaft und Wirtschaft	50
Tabelle 11:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Produktlinien-Analyse	51
Tabelle 12:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools für die Ökoeffizienz-Analyse	52
Tabelle 13:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der CO ₂ -Bilanzierung	52
Tabelle 14:	Beispiel einer Baugruppen-Einfluss-Analyse-Matrix	53
Tabelle 15:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Baugruppen-Einfluss-Analyse	54

Tabelle 16:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Ressourcen-FMEA	55
Tabelle 17:	Beispiel einer ABC-Analyse	56
Tabelle 18:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der ABC-Analyse	57
Tabelle 19:	Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Funktionsträger-Analyse	58
Tabelle 20:	Normen und Richtlinien zur lebenswegorientierten Bewertung	61
Tabelle 21:	Normen und Richtlinien für den Produktentwicklungsprozess	62
Tabelle 22:	Normen und Richtlinien zum Klären der Aufgabe	63
Tabelle 23:	Normen und Richtlinien zur Konzept- und Entwurfsphase	64
Tabelle 24:	Normen und Richtlinien zur Ausarbeitungsphase	64
Tabelle 25:	Typen von Umweltkennzeichnungen nach DIN-Normen	66
Tabelle 26:	Schulungsmaterial zur umweltfreundlichen Beschaffung	68
Tabelle 27:	Zielstellungen der Design-for-X-Strategien, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Ökodesign-Prinzip direkt bedingen	79

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (thermoplastische Terpolymere)
AGG	Ausgangsgröße (in Abbildung 21)
Al	Aluminium
BASF	Badische Anilin- & Soda-Fabrik
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer-Aided Design (deutsch: rechnergestütztes Konstruieren)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO_{2-eq}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DDSA	Design Decision Support Assistant (Methodenauswahl-Tool)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E	Entsorgung
EcoM2	Ecodesign Maturity Model
EG	Europäische Gemeinschaft
EGG	Einganggröße (in Abbildung 21)
EN	Europäische Normung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einfluss-Analyse
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung (Softwareprogramm)

GWP	Global Warming Potenzial (Treibhausgaspotenzial)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
k. A.	keine Angabe
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costing (Lebenszykluskosten-Analyse)
LED	Light-emitting diode (deutsch: lichtemittierende Diode)
MET	Materialfluss, Energieverbrauch, toxische Emissionen
MJ_{-eq}	Megajoule-Äquivalent
N	Nutzung
n	Undefinierte Anzahl
P	Produktion
PDM	Produktdatenmanagement(-Systeme)
PLA	Produktlinien-Analyse
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
ProgRes II	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II
PSS	Produkt Service System
R	Rohstoffgewinnung

RAL	Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen (Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung)
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens
UBA	Umweltbundesamt
UZ	Umweltzeichen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.

1 EINLEITUNG

Die Produktentwicklung beeinflusst die Ressourceneffizienz eines Produkts grundlegend. Eine ressourcenbewusste und vorausschauende Produktentwicklung kann den Materialeinsatz und folglich den Kostenaufwand entlang des gesamten Produktlebenswegs maßgeblich steuern. Im Hinblick auf endliche Ressourcen sollte sie einen Pfeiler der strategischen Unternehmensausrichtung bilden.

An die Produktentwicklung wird eine Vielzahl von Anforderungen gestellt. Dazu gehören¹

- der Einsatz innovativer Technologien und Werkstoffe,
- die Berücksichtigung wechselnder und schnelllebiger Märkte sowie
- die Verringerung der Produktentwicklungszeit und -kosten bei steigender Komplexität, Qualität und zunehmenden Funktionsumfang.

Mit diesen Anforderungen gehen z. B. ein gestiegener Anteil an Elektronik und Software, eine dissipative Verteilung der Materialien im Produkt, ein erhöhter Kostendruck und gesunkene Gewinnmargen einher. Gerade deshalb ist es wichtig, Ressourceneffizienz-Aspekte in den Produktentwicklungsprozess einfließen zu lassen – dies schont Ressourcen, senkt Kosten und generiert zugleich Wettbewerbsvorteile.

Eine ressourcenorientierte Zielstellung in der Produktentwicklung legt bereits fest, inwieweit ein Produkt fertigungsgerecht, demontagegerecht, reparatur- und instandhaltungsgerecht, materialgerecht oder recyclinggerecht sein wird. In der Produktentwicklung berücksichtigte Ressourceneffizienz-Maßnahmen, wie adäquate Fügeverfahren, Recyclingfähigkeit oder eine Leichtbauweise, fördern den ressourceneffizienten Umgang mit Rohstoffen und beeinflussen die entstehenden Kosten. Der Großteil der Herstellkosten – Quellen berichten von bis zu 85 %² – wird dabei bereits in der Produktentwicklung festgelegt. Die Einbindung von Ressourceneffizienz-Maßnahmen

¹ Vgl. Reinhäkel und Schilling (2007).

² Vgl. Ehrlenspiel (2007) in VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 34.

kann also Herstellkosten und, im Falle einer Produktrücknahme durch das Unternehmen am Ende der Nutzungsphase, auch Entsorgungskosten senken.

Dennoch sind Unternehmen oft wenig sensibilisiert für eine ressourcengerechte Gestaltung ihrer Produkte. Aus fehlender Praxiserfahrung resultieren oftmals Herausforderungen bei der Einführung und dem Management von produktbezogenen Ressourceneffizienz-Strategien.³ Meist werden Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte in der Produktgestaltung nur über gesetzliche Vorgaben in den Produktentwurf integriert, z. B. über die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG. Das Ressourceneffizienzprogramm II der Bundesregierung fordert, dass nach der Feststellung der Eignung „Mindest- und Informationsanforderungen an Produzenten zur Materialeffizienz, Lebensdauer und Recyclingfähigkeit von Produkten“⁴ in die Gesetzgebung einfließen sollen.

Die vorliegende Kurzanalyse richtet sich daher hauptsächlich an Akteure der Produktentwicklung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Sie soll als Handlungshilfe und Ideengeber dienen, Ressourceneffizienz-Aspekte bei Produktneu- und Anpassungsentwicklungen, über den gesetzlichen Rahmen hinaus, einzubeziehen.

Dazu werden in der Kurzanalyse die Phasen der Produktentwicklung systematisiert, eine ganzheitliche Betrachtung des Produktentwicklungsprozesses erläutert und unterschiedliche Innovationsstufen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz eines Produkts vorgestellt. Die Analyse bietet einen Überblick über Ressourceneffizienz-Strategien und konkrete Maßnahmen sowie deren Einbindungsmöglichkeiten in den Produktentwicklungsprozess. Ferner werden lebensweg- und prozessbezogene Methoden zur Bewertung und Einbindung von Ressourceneffizienz-Strategien sowie Normen und Richtlinien zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses vorgestellt.

³ Vgl. Pigosso et al. (2013), S. 160.

⁴ BMUB (2016), S. 53.

2 EINBINDUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IN DIE PRODUKTENTWICKLUNG

2.1 Der klassische und der integrierte Prozess der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist der Prozess von der Produktidee bis zum fertigen Produktentwurf. Das Ergebnis des Produktentwicklungsprozesses, also der Produktentwurf, stellt einen wesentlichen Faktor des unternehmerischen Erfolgs dar und kann bereits einen Großteil der gesamten Produktkosten und qualitativen Eigenschaften bestimmen.^{5, 6}

Der Produktentwicklungsprozess variiert von Unternehmen zu Unternehmen, wobei grundsätzliche Entscheidungen tendenziell gleichbleiben.⁷ Auch die Vorgehensweise kann in ihrem Ablauf verallgemeinert werden. Nach der Entscheidung zur Umsetzung einer Produktidee teilt die VDI-Richtlinie 2221 den weiteren Produktentwicklungsprozess in vier Phasen ein:

- (1) das Klären und Präzisieren der Aufgabe,
- (2) die Konzeptphase,
- (3) die Entwurfsphase und
- (4) die Ausarbeitungsphase.

Diese vier Phasen bilden den Betrachtungsrahmen der vorliegenden Kurzanalyse. Sie unterteilen sich nochmals in sieben Arbeitsschritte, die je nach Prozessfortschritt vollständig, teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen werden und in ein jeweiliges Arbeitsschrittergebnis münden.⁸ Nur eine **Neukonstruktion** durchläuft alle Produktentwicklungsphasen. Bei der **Anpassungskonstruktion** ist das Konzept bereits vorhanden, während geänderte Anforderungen an das Produkt in der Entwurfsphase berücksichtigt und umgesetzt werden (Abbildung 1).⁹

⁵ Vgl. Eigner et al. (2014), S. 5.

⁶ Vgl. Hahn und Kaufmann (2002), S. 751.

⁷ Vgl. Krishnan u. Ulrich (2001) in Weise (2007), S. 28.

⁸ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 9.

⁹ Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2013), S. 748, 744 und 751.

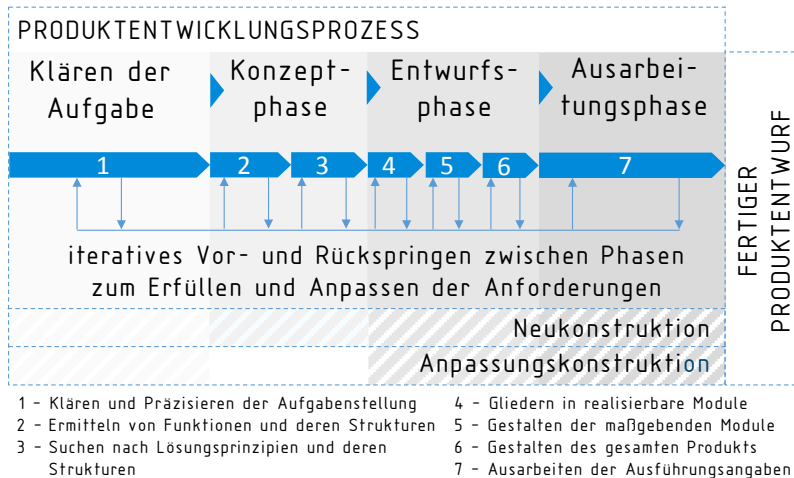


Abbildung 1: Vorgehensweise des klassischen Produktentwicklungsprozesses¹⁰

Durch einen schnellen Produktwandel, kürzere Innovationszyklen, komplexere Produkte und globale Angebots- und Nachfragestrukturen reicht die rein klassische Vorgehensweise zur Produktentwicklung nicht mehr aus. Vielmehr muss eine zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen dazu beitragen, die heutigen Anforderungen an Produktinnovationen zu gewährleisten. Das geschieht durch die sogenannte **integrierte Produktentwicklung**.

Viele Produkte setzen sich mittlerweile aus mechanischen, elektrischen, elektronischen, hydraulischen und/oder pneumatischen Teilkomponenten zusammen und bieten zusätzliche immaterielle Servicedienstleistungen an, wie das „Predictive Maintenance“. Dies erkennt als intelligentes System bereits eine Störung in einer Maschine, bevor sie auftritt.

Solche komplexen Produktsysteme bedürfen in der Entwicklungsphase einer integrierten Vorgehensweise, um dem Spannungsfeld „Zeit, Kosten und Qualität“ unter steigendem Wirtschafts- und Innovationsdruck erfolgreich zu

¹⁰ In Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9 und Pahl et al. (2013), S. 17.

begegnen. Bei einer gelungenen Umsetzung einer integrierten Produktentwicklung, z. B. durch das Simultaneous Engineering¹¹, kann ein Unternehmen so von verkürzten Entwicklungszeiten bei geringeren Kosten und zugleich verbesserter Qualität profitieren (Abbildung 2).¹²

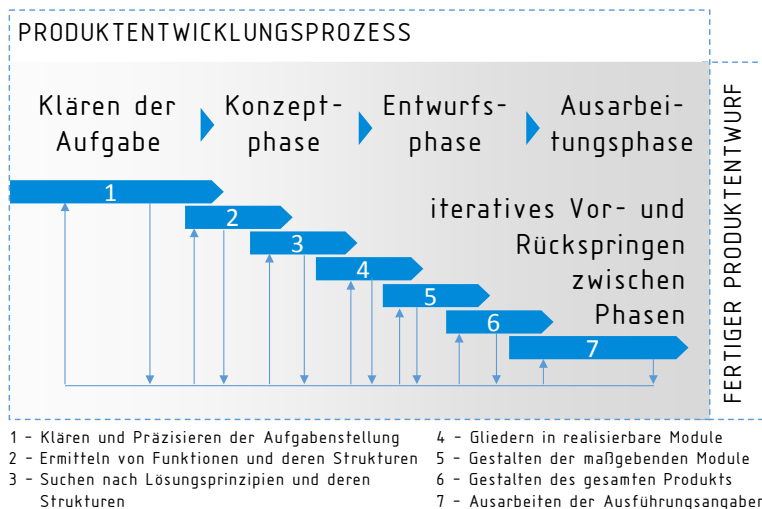


Abbildung 2: Vorgehensweise des integrierten Produktentwicklungsprozesses¹³

Es gibt eine Vielzahl an Vorgehensweisen und Methoden, die helfen, einen integrierten Ablauf während des Produktentwicklungsprozesses zu fördern. Vier wesentliche Faktoren bestimmen dabei den Gesamterfolg einer integrierten Produktentwicklung: Mensch, Methodik, Organisation und Technik.¹⁴ Die unterstützenden Elemente je Faktor sind in Abbildung 3 zusammengefasst.

¹¹ Das Simultaneous Engineering verkürzt die Produktentwicklungszeit, indem die einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (Phasen 1 - 7 in Abbildung 2 und 3) zeitlich parallel bzw. zeitlich überlappend bearbeitet werden, eine bessere Abstimmung zwischen den Projektteams der einzelnen Stufen stattfindet und somit Korrekturschleifen optimiert werden können.

¹² Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2013), S. 195.

¹³ In Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9 und Ehrlenspiel und Meerkamm (2013), S. 331.

¹⁴ Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2013), S. 195.

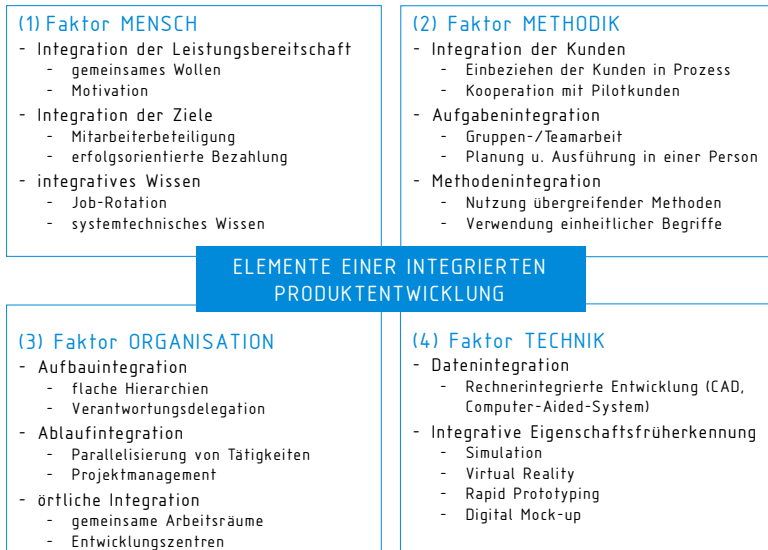


Abbildung 3: Elemente einer integrierten Produktentwicklung¹⁵

Neben den in Abbildung 3 aufgeführten Elementen sind interdisziplinäre Teams ein wesentlicher Erfolgsfaktor der integrierten Produktentwicklung. Teammitglieder unterschiedlicher Fachrichtungen und Prozessstufen ermöglichen eine umfassende Sicht auf die Entwicklung eines Produkts. So kann z. B. die Perspektive der Fertigungsvorbereitung, der Entsorgung, der Konstruktion, des Vertriebs, der Materialwirtschaft oder auch des Zulieferers miteinbezogen werden.

Diese Zusammenarbeit von produkt-, produktions- und vertriebsdefinierenden Bereichen entlang den Phasen des Produktentwicklungsprozesses (Klären der Aufgabe, Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase) bildet die Grundlage für eine integrierte Produktentwicklung.¹⁶ Unter der Annahme, dass die Ressourceneffizienz eine Unternehmensstrategie ist, fördert die integrierte Produktentwicklung zudem eine bereichsübergreifende Beachtung von Ressourceneffizienz-Aspekten, die in den einzelnen Teams je nach Fachzielstellung unterschiedlich definiert werden (Kapitel 3.2).

¹⁵ In Anlehnung an Erlenspiel und Meerkamm (2013), S. 209.

¹⁶ Vgl. Erlenspiel und Meerkamm (2013), S. 229.

2.1.1 Ressourceneffizienz-Aspekte beim Klären der Aufgabe

Der erste Schritt des Produktentwicklungsprozesses, das **Klären der Aufgabe**, dient der Aggregation notwendiger Informationen und resultiert in einer Anforderungsliste an das Produkt (1)¹⁷. Diese Anforderungsliste wird entlang den nachfolgenden Arbeitsschritten weitergereicht und als Dokumentation von Anforderungsänderungen, -ergänzungen und -anpassungen genutzt.¹⁸

Je nach Kundenwunsch oder eigener Produktidee sollte die Anforderungsliste bereits im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigende Anforderungen an die Ressourceneffizienz beinhalten. So kann festgelegt werden, wie z. B. recycling- oder montagegerecht ein Produkt zu gestalten ist oder, spezifischer, ob es z. B. einer Zertifizierung des „Blauen Engels“ unterliegen soll.

Beispiele für **Anforderungen** an ein Produkt in Bezug auf die Ressourceneffizienz:

- Das Produkt ist so zu gestalten, dass der geplante Verlust in der Produktion unter 10 % des Materialeinsatzes liegt.
- Das Produkt ist modular aufgebaut. Die Module sind austauschbar.
- 30 % der verwendeten Materialien sind Sekundärrohstoffe.
- Mindestens Elektromotoren des Energieeffizienzlevels III werden für Hauptantriebe eingesetzt.
- Über das Produkt wird ein Service verkauft (Produkt-Service-System).
- Das Produkt erfüllt die Bedingungen des „Blauen Engel“.
- Der Zustand wird überwacht (Predictive Maintenance¹⁹).
- Der Zustand von z. B. pH-Wert, Lösung, Kühlschmierstoff wird überwacht.

¹⁷ Die Zahlen in den Klammern entsprechen den Arbeitsschritten der Abbildungen 1 und 2.

¹⁸ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 9.

¹⁹ Durch das „Predictive Maintenance“ erkennt eine Maschine eine Störung, bevor diese auftritt.

2.1.2 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Konzeptphase

In der **Konzeptphase** werden entsprechend der Anforderungsliste Funktionen ermittelt und Lösungsprinzipien gesucht.²⁰ Dazu werden in einem ersten Schritt die Gesamtfunktion und darauffolgend Teilfunktionen des zu entwickelnden Produkts bestimmt, gegliedert und kombiniert (2). Die dabei entstehenden Funktionsbeschreibungen sind beispielsweise „Flüssigkeit fördern“, „Luft verteilen“, „Wasser zuführen“ oder „Schutz bieten“. Die Funktionen offenbaren logische sowie physikalische Abhängigkeiten und bilden die Basis zum Finden prinzipieller Lösungen, um diese Funktionsstrukturen zu realisieren (3). Dazu werden chemische, physikalische und andere Effekte gewählt, die die ermittelten Funktionen ausführen können. Zu den physikalischen Effekten zählen beispielsweise Kraft, Druck, Impuls, Geschwindigkeit, elektrischer Strom oder magnetischer Fluss.

Es werden, je nach Funktion, grob die einzusetzenden Werkstoffarten festgelegt (z. B. Kunststoff, Metall, Holz) und die Wirkflächen konzeptioniert, an denen die Umsetzung der gewählten physikalischen Effekte erzwungen wird.²¹ Im Ergebnis steht mindestens eine prinzipielle Lösung, die die Wirkstruktur des zu entwickelnden Produkts als u. a. Prinzipskizze, Schaltung oder Beschreibung darstellt.²² Zur Berücksichtigung der Ressourceneffizienz können hier z. B. bereits verschleißärmere Wirkmechanismen ausgewählt werden.

Auf Ebene der prinzipiellen Lösungen können ohne Bezug zum konkreten Anwendungsfall keine grundsätzlichen Beispiele mit positivem Beitrag zur Ressourceneffizienz genannt werden.

2.1.3 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Entwurfsphase

In der **Entwurfsphase** wird die prinzipielle Lösung in Module gegliedert, die die realisierbaren Teilsysteme bzw. Systemelemente in Form von u. a. Anordnungsskizzen, Graphen, Logikplänen oder Fließbildern sichtbar machen (4). Die entscheidenden Module werden dann grob gestaltet, um Optimierungsoptionen zu erkennen und zu realisieren (5). Eine ressourceneffiziente

²⁰ Vgl. Pahl et al. (2013), S. 341.

²¹ Vgl. Pahl et al. (2013), S. 341.

²² Vgl. VDI 2221 (1993), S. 10.

Gestaltung wird dabei beispielsweise durch eine Reduktion der Bauteilgrößen oder eine integrierte Bauweise erreicht. Im Ergebnis entstehen Vorentwürfe der maßgebenden Module. Diese werden über zusätzliche Detailangaben sowie die Verknüpfung aller Teilsysteme endgültig festgelegt und bilden im Ergebnis den Gesamtentwurf (6).²³

Beispiele für **die Entwurfsphase** eines Produkts zur Förderung der Ressourceneffizienz:

- Bauteilgrößen minimieren (Miniaturisierung)
- refabrizierte Bauteile einsetzen (Remanufacturing²⁴)
- Bauteile und Bauteilgruppen standardisieren und modularisieren
- Erweiterbarkeit und Aufrüstbarkeit des Produkts im Entwurf adressieren
- Verbindungstechniken zerlegefreundlich gestalten
- Sekundärrohstoffe einsetzen (z. B. recyciertes Kunststoffgranulat)
- biobasierte Materialien und alternative Werkstoffe wählen (z. B. hochfeste Stähle)

2.1.4 Ressourceneffizienz-Aspekte in der Ausarbeitung

Die **Ausarbeitungsphase** bzw. der Prozess des Konstruierens dokumentiert abschließend die ersten drei Prozessphasen in Form von u. a. Einzelteil-, Gruppen- und Gesamtzeichnungen (7).²⁵ Mit den angefertigten Konstruktionsunterlagen kann das Produkt hergestellt werden. Über numerische Verfahren wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) und passende Simulations-

²³ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11.

²⁴ Über das Remanufacturing (deutsch: Refabrikation) werden Altteile durch standardisierte Industrieprozesse so aufgearbeitet, dass diese in der Qualität mindestens einem äquivalenten Neuteil entsprechen.

²⁵ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 11.

software (z. B. Ansys, Matlab Simulink) können dabei produktspezifische sowie auch fertigungstechnische Verfahrensparameter auf ihre tatsächliche Funktionalität geprüft und optimiert werden.

Beispiele für die **Ausarbeitungsphase** eines Produkts zur Förderung der Ressourceneffizienz:

- Fügeverbindungen optimal dimensionieren (z. B. tatsächliche Zugfestigkeit von Schrauben ausnutzen)
- Wandstärken optimal dimensionieren (z. B. von Kunststoffteilen)
- Fließverhalten von flüssigem Kunststoff in der Spritzgussform simulieren
- Anguss der Form für Spritzgussteile optimal positionieren
- dynamisches Verhalten komplexer Systeme simulieren

2.2 Ressourceneffizienz durch eine umfassende Betrachtung des Produktlebenswegs

Die Entwicklung eines Produkts erfordert die ständige Kontrolle und Anpassung der Teilergebnisse des Produktentwicklungsprozesses (Schritte 1 bis 7 in Abbildung 1 und Abbildung 2). Um die ökonomischen und auch ökologischen Wirkungen sowie Folgen komplexer Produktentwicklungsprozesse in deren Verlauf abschätzen zu können, ist eine Bewertung der Auswirkungen über den gesamten Lebensweg des Produkts elementar.

Die Bewertung von Produktentwicklungsprozessen erfordert einen ganzheitlichen Ansatz. Ganzheitlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Wirkungen und Folgen des zu entwickelnden Produkts über den gesamten Lebensweg des Produkts abzuschätzen sind (Abbildung 4). Das ermöglicht es einem Unternehmen, z. B. unnötige Umweltbelastungen, vermeidbare Abfälle und insbesondere überhöhte Ressourcenverbräuche bereits in der Produktentwicklungsphase zu erfassen und ihnen vorzubeugen (z. B. über den Kumulierten Rohstoffaufwand, KRA). Über den ermittelten Kumulierten

Energieverbrauch (KEA) können zudem etwaige Überkompensationseffekte verdeutlicht werden: Die Energie, die für die Herstellung eines ressourceneffizienten Produkts benötigt wird, kann durch den erzielten energieeffizienten Produkteinsatz in der Nutzungsphase mehr als kompensiert werden.

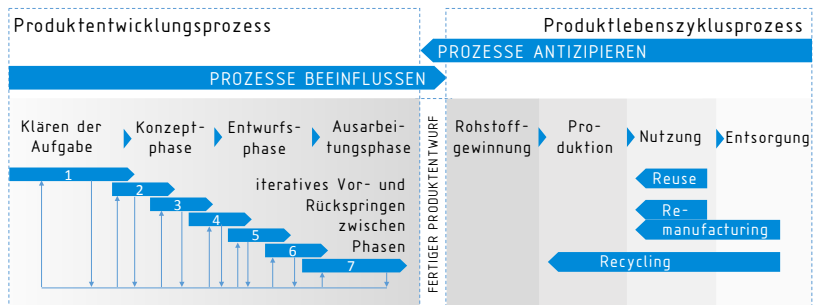


Abbildung 4: Integrierte Produktentwicklung mit ganzheitlicher Bewertung²⁶

Die Bewertung über den gesamten Lebensweg des zu entwickelnden Produkts gibt nicht nur eine Auskunft über die zu erwartenden Umweltbelastungen und Ressourcenverbräuche, sondern auch über die Kosten (Life Cycle Costing²⁷, LCC). Im verarbeitenden Gewerbe nehmen die Materialkosten für die Produktherstellung mit ca. 43 % den größten Kostenblock im Unternehmen ein.²⁸ In der Produktentwicklungsphase kann bereits ein großer Einfluss auf die Materialkosten genommen werden, wenn Ressourceneffizienz-Strategien beachtet und eine lebenswegbezogene Bewertung zur Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Folgen des zu entwickelnden Produkts angewandt werden.

Die Reichweite der Einflussnahme über die Produktentwicklung ist dabei jedoch begrenzt. Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der Lebenszyklusphasen, die durch die Produktentwicklung direkt beeinflusst bzw. nicht direkt beeinflusst werden können.

²⁶ In Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9, VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 33 und Pahl et al. (2013), S. 17.

²⁷ Das Life Cycle Costing ist eine systematische Analyse der fließenden Geldströme eines Produktsystems entlang dem gesamten Lebensweg.

²⁸ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017e), S. 12.

Tabelle 1: Reichweite der Einflussnahme über die Produktentwicklung²⁹

Direkter Einfluss der Produktentwicklung durch Festlegen:	Kein direkter Einfluss durch die Produktentwicklung auf:
Rohstoffgewinnung/Produktion	
<ul style="list-style-type: none"> • Art der eingesetzten Materialien (z. B. Metalle oder Kunststoffe) und die konkrete Zusammensetzung (z. B. Legierung und Verbunde) • Menge der eingesetzten Materialtypen (Wie viel Material pro Produktnutzen?) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoff-, Energie-, Emissionseffizienz der Abbau-, Umwandlungs-, und Weiterverarbeitungsprozesse der Rohstoffe und Vormaterialien • Ressourceneffizienz der Transportvorgänge
Nutzungsphase	
<ul style="list-style-type: none"> • Art der eingesetzten Energie (z. B. elektrisch oder chemisch) • spezifische Energieverbrauchsmenge je Nutzungseinheit • Art der entstehenden Emissionen (z. B. Schadstoffe, Stäube und Lärm) • absoluter Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • konkrete Art und Intensität der Nutzung (Ausprägung des Nutzerverhaltens) • Umfeldbedingungen der Nutzung (z. B. Raumtemperatur, Innen-/Außentemperaturen)
Entsorgungsphase	
<ul style="list-style-type: none"> • spezifische Schad- und Störstoffgehalte • Trenngrad der verschiedenen enthaltenen Materialien und Störstoffe • Kreislaufaufwand für die verschiedenen Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassungs- und Zuführungsgrad zu den Entsorgungsprozessen (Sammelleffizienz) • Kombination und Fahrweise der Entsorgungsprozesse • Schad-/Störstoffe für die konkrete Art/Fahrweise der Entsorgungsprozesse • Rohstoff-, Energie-, Emissionseffizienz der Verwertungsprozesse selbst

Über eine lebenswegbezogene Bewertung können jedoch Prozesse wie die Rohstoffgewinnung, die sich aus der gewählten Materialart ergibt, über Annahmen und Festlegungen mit in den Bewertungsprozess aufgenommen werden. Darüber hinaus zeigt sich, inwieweit eine gewählte Materialart Auswirkungen auf die Umwelt hat und ob adäquate Materialsubstitute mit beispielsweise einer effizienteren Rohstoffgewinnung die Umweltbelastung bei gleicher Produktqualität und gleichen Kosten sogar senken können.

²⁹ Vgl. Jepsen et al. (2014), S. 10 – 12.

2.3 Innovationsstufen zur Steigerung der Ressourceneffizienz eines Produkts

Die Steigerung der Ressourceneffizienz hängt von der jeweiligen Systemebene ab. Je umfassender die Systemebene ist, desto größer fällt das Ressourceneffizienzpotenzial aus.³⁰ Dabei können vier verschiedene Systemebenen bzw. Innovationsstufen unterschieden werden (Abbildung 5).

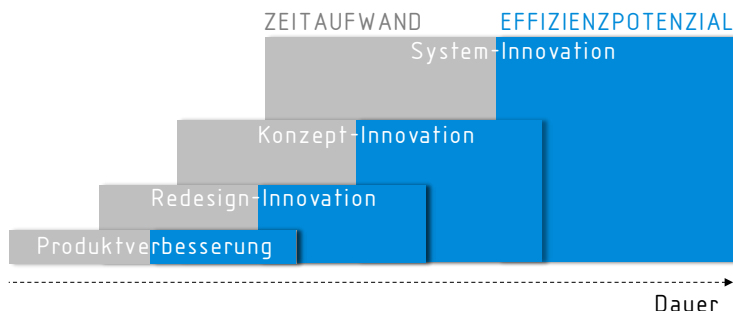


Abbildung 5: Innovationsstufen/Systemebenen³¹

Die **Produktverbesserung** nimmt Abwandlungen am bestehenden Produkt vor, wie Geometrieänderungen oder Werkstoffsubstitutionen. In einem kleinen Zeitfenster können so kleine Ressourceneffizienzpotenziale erschlossen werden. Produktveränderungen können auch aus Änderungen des Fertigungsprozesses resultieren, z. B. durch die Prozessumstellung auf endabmessungsnahes Umformen.³² Wird das Produktbeispiel „Automobil“ betrachtet, ermöglicht die Substitution von Stählen durch Aluminium eine Gewichtsreduktion und somit eine Kraftstoffeinsparung.³³ Die Arbeiten des VDI ZRE liefern unter anderem Beispiele zur Produktverbesserung. Diese sind

- der Einsatz von Leichtbaumaterialien (z. B. hochfeste Stähle, Kurzanalyse „Ressourceneffizienz im Leichtbau“³⁴),

³⁰ Vgl. Oberender (2006), S. 19.

³¹ In Anlehnung an VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 35.

³² Die Praxisbeispiele für die einzelnen Innovationsstufen beziehen sich auch auf die Verbesserung des Produktionsprozesses, wobei in diesem Fall das Produktionsequipment das Produkt darstellt.

³³ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 35.

³⁴ Vgl. Kaiser et. al. (2016).

- die Oberflächenbeschichtung unter Nutzung des Lotuseffekts zur besseren Reinigung und Pflege von Produkten (Kurzanalyse „Ressourceneffizienz durch Bionik“³⁵),
- Biobasierte Grundöle zum Einsatz bei Schmierstoffen (Kurzanalyse „Ressourceneffizienz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe“³⁶).

In der **Redesign-Innovation** umfasst die Verbesserung bereits zentrale Teilsysteme eines Produkts. Es wird also mindestens der Entwurf des Produkts umgestaltet, angepasst, erweitert bzw. optimiert. Bestehende Produktionsprozesse müssen oder können dabei vollkommen durch alternative Fertigungsverfahren ersetzt werden. Das Beispiel „Automobil“ zeigt, dass die Integration eines Hybridmotors anstelle eines klassischen Verbrenners eine Redesign-Innovation darstellt.^{37, 38} Andere Beispiele, bezogen auf Fertigungssysteme, sind

- die bedarfsgerechte Druckluftherzeugung durch Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte (Studie „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“³⁹),
- die Anpassung des Drucks einer Spritzgussmaschine an die Viskosität des geschmolzenen Kunststoffgranulats zur Füllung in die vorgesehene Form (Film „Kunststoff: Weniger Material, mehr Qualität“⁴⁰),
- der Einsatz von Porenbrennern in Öfen statt des Verfahrens des Lösungslühens im Ofen (Film „Edelstahlguss ganz ohne Feuer“⁴¹).

³⁵ Vgl. Niebaum et al. (2017).

³⁶ Vgl. Saulich (2016).

³⁷ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 35.

³⁸ Die Praxisbeispiele für die einzelnen Innovationsstufen beziehen sich auch auf die Verbesserung des Produktionsprozesses, wobei in diesem Fall das Produktionsequipment das Produkt darstellt.

³⁹ Vgl. Schebek et al. (2017).

⁴⁰ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b).

⁴¹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017c).

Bei der **Konzept-Innovation** wird das gesamte Produktkonzept überarbeitet, erneuert und revidiert, woraus völlig neue Produktstrukturen, Teilsysteme und Baugruppen resultieren. Im Fallbeispiel des „Automobil“ beschreibt der Austausch eines konventionellen Kleinwagens mit einem Elektro-Stadtauto eine Konzept-Innovation.^{42, 43} Andere Beispiele sind

- der Einsatz einer keramischen Matrix zur Vorerhitzung von Pfannen für das Schmelzen von Metall statt der Vorerhitzung dieser über offenem Feuer (Film „Edelstahlguss ganz ohne Feuer“⁴⁴) sowie
- der Einsatz von Guss- statt Fräsprozessen in der Fertigung (Film „Feines Gießen statt grober Hobel“⁴⁵).

Bei der **System-Innovation** wird eine wesentliche Änderung von Produktkonzepten und deren Infrastrukturen durchgeführt. Im Fall des „Automobils“ wäre der Aufbau eines kombinierten, smarten Verkehrssystems, in dem die einzelnen Komponenten (Autos, Ampeln, Fahrräder etc.) miteinander kommunizieren, ein Beispiel für eine System-Innovation.⁴⁶ Andere Beispiele sind:

- die Nutzung digitaler Systeme in der Wertschöpfungskette durch Industrie 4.0. Eine Prozessoptimierung bis hin zum Lieferanten kann z. B. über Stoffstromvisualisierungen durch Echtzeitdatenerfassung erfolgen, um weitere wertschöpfungsstufenübergreifende Ressourceneffizienzpotenziale offenzulegen (Studie „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“⁴⁷),
- der Aufbau von industriellen Symbiosen (wirtschaftlicher Zusammenschluss benachbarter Unternehmen mit dem Ziel, einer Kaskadennutzung von Reststoffen und Energie sowie einer gemeinsamen Nutzung von Infrastrukturen, Dienstleistungen und sozialen Einrichtungen⁴⁸).

⁴² Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 35.

⁴³ Die Praxisbeispiele für die einzelnen Innovationsstufen beziehen sich auch auf die Verbesserung des Produktionsprozesses, wobei in diesem Fall das Produktionsequipment das Produkt darstellt.

⁴⁴ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017c).

⁴⁵ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017d).

⁴⁶ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 35 f.

⁴⁷ Vgl. Schebek et al. (2017).

⁴⁸ Vgl. The Waste and Resources Action Programme (2017).

3 RESSOURCENEFFIZIENZ-MAßNAHMEN IM PRODUKTENTWICKLUNGSPROZESS

In der Produktentwicklung wird entschieden, wie wartungsfreundlich, recycling-, montage- oder reparaturgerecht ein Produkt gestaltet ist. Adäquate Werkstoffe werden gewählt, Bauteilformen oder modulare Elemente konzipiert und der Technologieeinsatz bestimmt. Dabei spielt die Ressourceneffizienz eine immer größere Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit und somit den unternehmerischen Erfolg.

Die Auswahl und Festlegung von Produkteigenschaften, insbesondere in den Phasen der Aufgabenklärung und der Konzept- sowie Entwurfsphase, sollte im Idealfall unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz-Aspekten erfolgen. Dazu stehen Akteuren der Produktentwicklung verschiedene Ressourceneffizienz-Strategien und konkrete Maßnahmen zur Verfügung (Abbildung 6, Kapitel 3.1, Kapitel 3.2).

Dennoch bleibt die Umsetzung solcher Ressourceneffizienz-Aspekte im Produktentwicklungsprozess bisher hinter den Möglichkeiten zurück. Die Gründe dafür sind⁴⁹

- das Fehlen von Systematisierung, Leitlinien und der Wissensweitergabe von Praxiserfahrungen zur Einführung von Ressourceneffizienz-Aspekten,
- die fehlende Erfahrung in der Umsetzung erfolgreicher Pilotprojekte in etablierte Unternehmensabläufe,
- die fehlende Integration von Ressourceneffizienz-Aspekten in das Unternehmensmanagement bzw. in die strategische Unternehmensausrichtung,
- Schwierigkeiten in der Auswahl und Priorisierung von Ressourceneffizienz-Maßnahmen.

Um Unternehmen die Integration von Ressourceneffizienz-Aspekten zu erleichtern, wurden als Hilfestellung verschiedene Anwendungen im Produktentwicklungsablauf erstellt.

⁴⁹ Vgl. Pigosso et al. (2013), S. 161.

Das „Ecodesign Maturity Model (EcoM2)“ zielt beispielsweise darauf ab, den Status quo angewandter Ressourceneffizienz-Maßnahmen im Unternehmen zu bewerten. Nicht erschlossene Ressourceneffizienzpotenziale können dann mit Hilfe des Modells stufenweise in das Produktlebenszyklusmanagement und in damit verbundene Prozesse sowie strategische Unternehmensziele und Treiber integriert werden.⁵⁰

Die Ressourceneffizienzpotenziale können über verschiedene Methoden bewertet und erschlossen werden. Dem Produktentwickler steht dabei eine Vielzahl an Methoden für eine Lebenswegbewertung und für eine produktentwicklungsbezogene Bewertung zur Verfügung (Abbildung 6, Kapitel 3.3). Bei der Auswahl der geeigneten Bewertungsmethode kann das Tool „Design Decision Support Assistant“ (DDSA) den Produktentwickler unterstützen. Dieser umfasst 29 Methoden, aus denen, entsprechend den festgelegten Kriterien des Produktentwicklers, passende Bewertungsmethoden ausgewählt werden.⁵¹

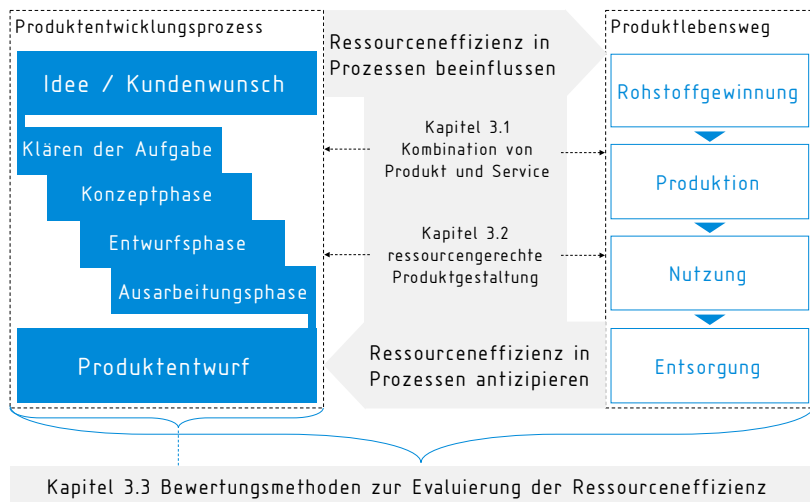


Abbildung 6: Ressourceneffizienz-Strategien und Bewertungsmethoden⁵²

⁵⁰ Vgl. Pigosso et al. (2017).

⁵¹ Vgl. Buchert et al. (2017), S. 403.

⁵² In Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9, VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 33 und Pahl et al. (2013), S. 17.

3.1 Ressourceneffizienz durch die Kombination von Produkt und Service

Das Produkt-Service-System ist eine vermarktbare Kombination von Produkten und Dienstleistungen, die gemeinsam in der Lage sind, einen Nutzerbedarf zu erfüllen.⁵³

Es lassen sich drei Arten von Produkt-Service-Systemen (PSS) in Abhängigkeit von der Verteilung der Service- und der Produktanteile unterscheiden (Abbildung 7).⁵⁴



Abbildung 7: Drei Kategorien von Produkt-Service-Systemen⁵⁵

Beim **produktorientierten Produkt-Service-System** steht das Produkt im Mittelpunkt. Der Hersteller kann zum Produkt einen zusätzlichen Service, z. B. eine Beratungsdienstleistung, anbieten. Wird durch den Hersteller beispielsweise eine Produktrücknahme nach Ende der Nutzungsphase angeboten, sollte in diesem Fall, jedoch auch generell, während des Produktentwicklungsprozesses u. a. auf eine demontage-, reparatur- bzw. instandhaltungsgerechte sowie recycling- und entsorgungsgerechte Gestaltung des Produkts geachtet werden (Kapitel 3.2.2, Kapitel 3.2.5).⁵⁶

⁵³ Vgl. Goedkoop (1999), S. 18.

⁵⁴ Vgl. Tukker (2004), S. 248.

⁵⁵ In Anlehnung an Tukker (2004), S. 248.

⁵⁶ Vgl. Gräble et al. (2010), S. 2036.

Bei **nutzungsorientierten Produkt-Service-Systemen** wird dem Kunden die Nutzung eines Produkts zur Verfügung gestellt. Der Hersteller übernimmt die Garantie für die Funktion, z. B. durch Wartungs- und Reparaturarbeiten. Das Produkteigentum verbleibt während der gesamten Nutzungsphase beim Hersteller, an den das Produkt nach Ende der Nutzungsphase wieder übergeben wird. Typische Beispiele für nutzungsorientierte Produkt-Service-Systeme sind Bau- und Produktionsmaschinenleasing oder -vermietung.⁵⁷

Die **ergebnisorientierten Produkt-Service-Systeme** umfassen die Kategorie mit dem höchsten Serviceanteil. Verträge mit dem Kunden werden über eine zu erbringende Leistung abgeschlossen, die beispielsweise die Reinigung einer definierten Fläche umfasst. Die Abrechnung erfolgt somit je erbrachter Serviceeinheit, z. B. in Euro je Quadratmeter gereinigter Fläche. Ein typisches Beispiel dafür bietet das Chemikalienleasing (blauer Kasten). Andere Beispiele sind die Abrechnung je geflogener Stunde für Triebwerke⁵⁸ oder ein Festpreis je genutztem Kubikmeter Druckluft⁵⁹. Bei allen Beispielen wird entweder die Chemikalie, das Triebwerk oder die Druckluftmaschine vom Hersteller überwacht, gewartet und zurückgenommen.

Beispiel Chemikalienleasing⁶⁰

Chemikalien, die nicht reaktiv verbraucht werden, sondern rückgewinnbar sind, können zwischen Unternehmen unter Anwendung des innovativen Geschäftsmodells des Chemikalienleasings gehandelt werden. Anstelle der klassischen mengenbezogenen Bezahlung (z. B. €/t) erfolgt eine ergebnisorientierte Vergütung (z. B. €/m² gereinigter Fläche).

Durch die geänderte Vergütung entsteht ein wirtschaftliches Interesse des Chemikalienherstellers, den Verbrauch chemischer Produkte beim Anwender durch Prozessoptimierung zu senken, anstatt den mengenbasierten Verkauf der Chemikalien zu steigern (Abbildung 8).

⁵⁷ Vgl. Gräble et al. (2010), S. 2036.

⁵⁸ Vgl. Rolls-Royce (2012).

⁵⁹ Vgl. Kaeser Kompressoren Se (2017).

⁶⁰ Vgl. Leismann et al. (2012), S. 37 f.



Das Modell des Chemikalienleasings und die daraus folgenden gleichgerichteten Interessen von Lieferant und Kunde resultieren in Vorteilen wie:

- der Schonung von Ressourcen,
- der Verringerung von Umweltbelastungen,
- der Energieeinsparung und
- der Vermeidung/Verringerung von Abfällen.⁶²

Gerade bei Produkten, die als nutzungs- bzw. als ergebnisorientierte Produkt-Service-Systeme vorgesehen sind, ist auf eine demontage-, reparatur- bzw. instandhaltungsgerechte sowie eine nutzungsoptimierte bzw. recycling- und entsorgungsgerechte Produktgestaltung während der Produktentwicklungsphase zu achten (Kapitel 3.2). Dadurch verbessert der Anbieter von Produkt-Service-Systemen seine ökonomische sowie ökologische Bilanz. Weitere Vor- und Nachteile, die aus Produkt-Service-Systemen resultieren, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

⁶¹ In Anlehnung an Leismann et al. (2012), S. 38.

⁶² Vgl. Leismann et al. (2012), S. 37 f.

Tabelle 2: Umweltwirkungen von Produkt-Service-Systemen⁶³

Positive Umweltwirkungen	Negative Umweltwirkungen
<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz langlebiger Produkte und verbrauchsarmer und/oder leistungsstarker Geräte • Berücksichtigung des technisch-ökologischen Fortschritts • Förderung recycling- und entsorgungsgerechter Konstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> • größerer verbrauchsbedingter Verschleiß/Übernutzung • (zu) lange Verwendung ineffizienter Geräte

3.2 Ressourcengerechte Produktentwicklung und konkrete Ressourceneffizienz-Maßnahmen

In der Produktentwicklung werden die Gestaltungsanforderungen an das zu entwickelnde Produkt festgelegt und umgesetzt. Dazu zählen:

- eine fertigungsgerechte Produktgestaltung,
- eine demontagegerechte Produktgestaltung,
- eine reparatur- und instandhaltungsgerechte Produktgestaltung,
- eine werkstoff- und materialgerechte Produktgestaltung,
- eine funktions-/nutzungsgerechte Produktgestaltung oder
- eine recycling- und entsorgungsgerechte Produktgestaltung.

Diese Anforderungen werden unter dem Begriff „Design for X“ zusammengefasst, wobei viele Anforderungen ebenfalls Prinzipien des Ökodesigns⁶⁴ bedienen. Zu den Prinzipien des Ökodesigns zählen:⁶⁵

- die Langlebigkeit des Produkts,
- die Reparierbarkeit des Produkts,

⁶³ Vgl. Leismann et al. (2012), S. 20.

⁶⁴ Das Ökodesign ist ein systematischer Ansatz zur Produktgestaltung, um durch ein angepasstes Produktdesign die Umweltbelastungen über den gesamten Lebensweg des Produkts zu verringern (Vgl. Umweltbundesamt (2017)).

⁶⁵ Vgl. Ökopol (2012).

- die Materialeffizienz des Produkts,
- die Energieeffizienz des Produkts,
- die Problemstoffarmut des Produkts,
- der Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Produkt und
- die Kreislauffähigkeit des Produkts.

Die „Design for X“-Strategien und die Prinzipien des Ökodesign sind in Abbildung 9 gegenübergestellt. Dadurch zeigt sich, zwischen welchen Strategien und Ökodesign-Prinzipien eine Verknüpfung hergestellt werden kann.

		Prinzipien des Ökodesign						
		Langlebiges Produkt	Reparierbares Produkt	Materialeffizientes Produkt	Energieeffizientes Produkt	Problemstoffarmes Produkt	Einsatz nachwachsender Rohstoffe	Kreislauffähiges Produkt
„Design-for-X“-Strategien	Fertigungsgerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.1)							
	Demontagegerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.2)	■	■					■
	Reparier-/instandhaltungsgerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.2)	■	■					■
	Werkstoff-/materialgerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.3)	■		■	■	■	■	■
	Funktions-/nutzungsgerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.4)	■	■	■	■		■	■
	Recycling-/entsorgungsgerechte Produktgestaltung (Kapitel 3.2.5)	■	■	■				■

■ Die Zielstellung der ‚Design-for-X‘ - Strategie bedingt mit hoher Wahrscheinlichkeit direkt das Ökodesign-Prinzip

Abbildung 9: Verknüpfung von Design-for-X-Strategien und Ökodesign-Prinzipien (Herleitung im Anhang)

Beispielsweise begünstigt eine demontagegerechte Produktgestaltung mit hoher Wahrscheinlichkeit die Kreislaufführbarkeit des Produkts, da es leichter in seine Bestandteile zerlegt werden kann, z. B. für eine weitere Bauteilwiederverwendung oder ein Recycling.

Die in Abbildung 9 gelisteten Design-for-X-Strategien können erweitert bzw. weiter detailliert werden und sind somit nicht als abschließend zu verstehen. Einige Strategien können andere ausschließen bzw. rufen einen Zielkonflikt hervor. So muss eine fertigungsgerechte Produktgestaltung nicht unbedingt einer nutzungs- oder recyclinggerechten Produktgestaltung entsprechen. Im gegenteiligen Fall entstehen aber auch Synergien. So geht eine demontagegerechte Produktgestaltung oftmals mit einer reparatur- bzw. instandhaltungsgerechten Produktgestaltung einher.

3.2.1 Fertigungsgerechte Produktgestaltung

Die fertigungsgerechte Produktgestaltung zielt auf eine Aufwandsverringering im Produktionsprozess ab. Zu montierende Bauteile und Bauteilgruppen lassen sich beispielsweise über eine integrierte Bauweise (Zusammenfassung mehrerer Bauteile in einem) reduzieren.⁶⁶ Damit gehen eine verringerte Abfallerzeugung (Ausschuss) bzw. Material- und Energieeinsparungen im Prozess einher.⁶⁷ Es können aber auch z. B. komplex aufgebaute Bauteile in einfach zu produzierende Bauteilbestandteile geteilt werden, wobei jedoch ein möglicher erhöhter Montageaufwand zu berücksichtigen ist.

Weitere Ressourceneffizienz-Strategien zur Umsetzung einer **fertigungsgerichten Produktgestaltung** sind:^{68, 69}

- die Optimierung oder Reduzierung der Anzahl der Flächen und der Flächengröße des Produkts,
- die Reduzierung der Fertigungsschritte und der Eigenfertigungen, beispielsweise durch einen überlegten Zu- bzw. Einkauf von Bauteilen, wie refabrizierter Bauteile,

⁶⁶ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600 f.

⁶⁷ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 42.

⁶⁸ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600 f.

⁶⁹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 42.

- die Reduzierung des Bearbeitungsvolumens und das Vermindern des Werkzeugverschleißes und der Belegungszeiten von Betriebsmitteln durch intelligente Entwürfe bzw. Konstruktionen des Produkts, beispielsweise endabmessungsnahes Urformen oder Umformen,
- die Optimierung der Fertigung durch die Vereinheitlichung des Fertigungsverfahrens: standardisierte Baureihen, Einsatz von einheitlichem Werkzeug und Erhöhung der Losgrößen (Mehrfachverwendungen, Einsatz von Baureihen bzw. Baukästen).

3.2.2 Demontage- und reparaturgerechte Produktgestaltung

Die demontagegerechte Produktgestaltung sieht vor, den Prozess der Demontage so weit wie möglich zu vereinfachen. Davon profitieren gleichzeitig die Reparatur-, Instandhaltungs- und Wartungsfreundlichkeit eines Produkts sowie die Recyclingfähigkeit und demnach die Lebensdauer und Kreislauffähigkeit. In der Praxis können z. B. eine integrierte Bauweise, also die Reduktion der Bauteilanzahl, als auch angepasste Fügeverfahren (u. a. Klickmechanismen statt Klebeverbindungen, additive Fertigung) zu einer erleichterten Demontage führen. Insbesondere für Produkte, die als sogenannte Produkt-Service-Systeme (Kapitel 3.1) hergestellt werden, müssen eine optimierte Wartung, Instandhaltung und Reparierbarkeit gewährleistet werden.

Ressourceneffizienz-Strategien zur Umsetzung einer **demontagegerechten Produktgestaltung** sind u. a.:⁷⁰

- das Verfolgen einer einfach strukturierten Baustruktur mit gleichen Demontage- und Fügerichtungen,
- die Anordnung von Verbindungselementen bzw. Demontageverbindungen, so dass sie leicht auffindbar und zugänglich sind,
- die Wahl von Verbindungselementen bzw. Demontageverbindungen in leicht lösbarer Ausführung,

⁷⁰ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017a).

- die Verringerung von feinmotorischen Arbeiten bei der Entnahme oder Positionierung, die Gestaltung benutzerfreundlicher Greif- und Bewegungsräume,
- die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit der Verbindungselemente bzw. Demontageverbindungen entlang dem gesamten Lebensweg, z. B. durch Schutzeinrichtungen,
- die Gewährleistung reversibler Montagevorgänge,
- die Verringerung der Demontagezeit und der Demontagewege durch z. B. etablierte, einfache bzw. standardisierte Montiertechniken.

Ressourceneffizienz-Strategien zur Umsetzung einer **reparaturgerechten Produktgestaltung** sind u. a.:^{71, 72}

- das Verfolgen einer einfachen Baustruktur zugunsten einer leichten Reinigung sowie der Einsatz schmutzabweisender Oberflächen,
- die Lenkung des unumgänglichen Verschleißes auf Bauteile, die leicht austauschbar bzw. reparierbar sind,
- die Wahl einer einfachen Verschleißerkennung, um Verlust von Reserven bei zu früher Wartung und von Folgeschäden bei zu später Wartung zu vermeiden,
- das Aufmerksammachen des Produktnutzers auf anstehende Serviceeinheiten des Produkts durch Hinweise, wie Signalleuchten,
- das Auslegen der Verbindungselemente und Baugruppen für standardisiertes Werkzeug, um den Einsatz von Spezialwerkzeugen zum Warten/Reparieren zu vermeiden.

⁷¹ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600.

⁷² Vgl. ECODESIGN Pilot (2017b).

3.2.3 Werkstoff-/materialgerechte Produktgestaltung

Ein wichtiger Stellhebel zur Umsetzung von Materialeffizienz in der Produktion, Nutzung und Entsorgung ist die materialgerechte Produktgestaltung. In der Produktentwicklung kann festgelegt werden, dass die einzusetzende Materialmenge gering zu halten ist, dass das Gewicht des Produkts gesenkt und/oder die Umweltbelastungen, hervorgerufen durch die verwendeten Materialien, zu minimieren sind (beispielsweise Zertifizierung mit dem „Blauen Engel“ als Produkthanforderung). Dazu kann u. a. die Bauteilanzahl reduziert oder eine adäquate Auswahl von Werkstoffmaterialien (u. a. Sekundärrohstoffe, biobasierte Rohstoffe, Leichtbau) eingesetzt werden.

Andere Ressourceneffizienz-Strategien, die eine **werkstoff-/materialgerechte Produktgestaltung** fördern, sind:^{73, 74}

- die Optimierung von Bauteilgröße, -anzahl und -auslegung, (z. B. Wanddicke und Bauteilkonstruktion),
- die Verarbeitung von Werkstoffen, die eine gute Umwelt- bzw. Ökobilanz aufweisen (Anwendung von Indikatoren wie Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) oder Kumulierter Energieaufwand (KEA), Kapitel 3.3),
- die Vermeidung und Reduzierung von problematischen, gefährlichen und toxischen Werkstoffen und Bestandteilen,
- der Einsatz von Werkstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen (unter der Maßgabe, dass nicht mehr Rohstoff benötigt wird, als im gleichen Zeitraum nachwachsen kann, der Anbau umweltverträglich ist und keine Flächenutzungskonkurrenzen mit Nahrungsmittelproduktionen eintreten⁷⁵),
- der Einsatz von Sekundärrohstoffen und rezyklierbaren Rohstoffen zur Förderung der Kreislaufführbarkeit,
- die Anwendung von Verschleißschutz-, Korrosionsschutz- und Hartstoffschichten,

⁷³ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600.

⁷⁴ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017c).

⁷⁵ Vgl. VDI 4800 Blatt 1, S. 22.

- die Vermeidung nicht trennbarer Werkstoffverbunde bzw. von Bauteilen und Baugruppen aus jeweils einem Material (Einstoffteile),
- die Vermeidung von Rohstoffen und Bauteilen, die einer umweltgefährdenden und/oder sozial problematischen Rohstoffgewinnung bedürfen.

3.2.4 Funktions- und nutzungsgerechte Produktgestaltung

Die ressourcenintensivste Lebensphase ist insbesondere bei energieverbrauchenden Produkten die Nutzungsphase. Das Verhalten des Nutzers kann durch konstruktive Maßnahmen positiv gelenkt oder eine fehlerhafte Nutzung durch hinweisende Maßnahmen vermieden werden.⁷⁶

Ressourceneffizienz-Strategien, die eine **funktionsgerechte Produktgestaltung** unterstützen, sind u. a.:⁷⁷

- die Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit des Produkts, z. B. durch konstruktive Maßnahmen, wie Schutzsysteme zur Sicherung im Falle einer Überlast,
- die Gewährleistung einer hohen Produktqualität durch u. a. die Verringerung von Störgrößen,
- das Einkalkulieren bzw. Ermöglichen von Technologieweiterentwicklungen durch eine Aufrüstbarkeit des Produkts,
- das Nachstellen bzw. Justieren des Produkts ermöglichen, um auftretenden Verschleiß im Produkt auszugleichen,
- das Anstreben einer möglichst robusten Produktausführung bei gleichzeitig einfacher Funktionsstruktur.

Ressourceneffizienz-Strategien, die eine **nutzungsgerechte Produktgestaltung** unterstützen, sind:⁷⁸

⁷⁶ Vgl. VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 23.

⁷⁷ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017d).

⁷⁸ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017e).

- die Verhinderung einer Produktfehlnutzung, die eine schädliche Umweltwirkung nach sich zieht,
- die Anzeige des gegenwärtigen Energie- oder Betriebsmittelverbrauchs des Produkts während der Nutzung,
- die Reduzierung des Energiebedarfs während der Nutzung durch die Verbesserung des Wirkungsgrads,
- die Vermeidung von Abfällen während der Nutzung, auch durch den Einsatz kreislaufführbarer Hilfs- und Betriebsstoffe,
- die Abstimmung der Lebensdauern der verbauten Komponenten und die Nutzung eines zeitlosen Designs,
- die Gestaltung gebrauchstauglicher Oberflächen.

3.2.5 Recycling- und entsorgungsgerechte Produktgestaltung

Die Anpassung der Produktgestalt an potenzielle Recyclingverfahren unterstützt eine Kreislaufführbarkeit von Materialien und schont Primärrohstoffe durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen. Insbesondere eine leichte Trennbarkeit der verarbeiteten Materialien und der Verzicht von Materialverbunden fördern die Recyclingfähigkeit.⁷⁹

Ressourceneffizienz-Strategien zur Förderung einer **recycling- und entsorgungsgerechten Produktgestaltung** sind neben den Ressourceneffizienz-Strategien für eine demontage-, reparatur- und materialgerechte Produktgestaltung:⁸⁰

- die Gewährleistung, dass Wertstoffe einfach zu entnehmen und zu trennen sind,
- die Gewährleistung, dass eingesetzte Materialien für eine Wiederverwertung in Frage kommen,

⁷⁹ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 607.

⁸⁰ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017f).

- der Einsatz recyclingverträglicher Oberflächenbeschichtungen,
- die Gewährleistung, dass Betriebs- und Schadstoffe einfach zu entnehmen sind,
- das Einkalkulieren der Sammelart und der Anfallstelle des Abfalls,
- Informationen über die Entsorgungsart des Produkts am Produkt selbst,
- die Einhaltung einer normgerechten Kennzeichnung aller eingesetzten Werkstoffe (sofern Normen und Richtlinien vorhanden sind),
- das Einkalkulieren von Möglichkeiten zur Wiederverwendung ganzer Baugruppen (Remanufacturing).

3.2.6 Praxisbeispiele

(1) Ressourceneffiziente Gestaltung von LED-Lampen

Das Unternehmen Seidel GmbH entwickelte LED-Lampen, die nur aus sieben Bestandteilen bestehen und über Steckverbindungen zusammengebaut werden können. Der Einsatz von Kleber und Zinn für Lötverbindungen wurde eingespart. Anstelle von Aluminiumgusskörpern wurde für die Kühlung der LEDs ein Aluminiumblech verwendet, wodurch der Materialeinsatz um die Hälfte reduziert werden konnte.

Durch weitere Ressourceneffizienz-Maßnahmen konnte der Rohstoffaufwand insgesamt um 90 % und der Energieaufwand um 50 % im Vergleich zu herkömmlichen LEDs reduziert werden. Im Ergebnis konnten die LED-Lampen die strengen Kriterien des „Blauen Engels“ (RAL-UZ 151) erfüllen und sind mit dessen Siegel zertifiziert.

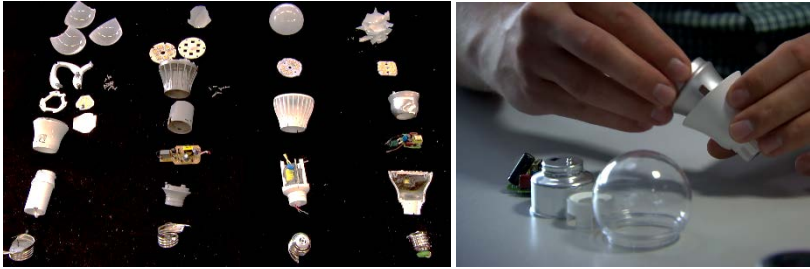


Abbildung 10: Vergleich des Aufbaus von LED-Lampen (links: vier herkömmliche LED-Lampen; rechts: LED-Lampe der Firma Seidel GmbH)⁸¹

(2) Ressourceneffiziente Textilien

Die Textilien der Climatex AG bedienen die Ökodesign-Kriterien der Langlebigkeit, Recyclingfähigkeit sowie des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe. Sie sind temperatur- und feuchtigkeitsregulierend, d. h., sie können sowohl Kälte als auch Wärme isolieren. Zu den weiteren Eigenschaften zählen eine schwere Entzündbarkeit und Reißfestigkeit.⁸²

Eine Verbindungstechnologie, die Naturfasern und Kunstfasern verschränkt, ermöglicht die sortenreine Trennung der Materialien nach der Nutzungsphase, so dass die Textilien vollständig recycelbar sind. Durch die Erfüllung der Ökodesign-Kriterien sind die Textilienprodukte des Unternehmens mit dem Cradle-to-Cradle⁸³-Zeichen zertifiziert.

(3) Ressourceneffizienter Automobillack

Der Automobillack der Firma BASF erzielt durch seine technischen Eigenschaften eine Reflexion der Infrarotstrahlung des Sonnenlichts. Die Temperatur der Karosserie kann um 20 °C und die des Innenraums um 4 °C verringert werden. Diese Optimierung reduziert die Klimatisierung von Fahr-

⁸¹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017a).

⁸² Vgl. Bundespreis-Ecodesign (2016), S. 14.

⁸³ Produkte, die das Cradle-to-Cradle-Zertifikat erhalten, setzen u. a. umweltsichere, gesunde und wiederverwertbare Materialien, Sonnenenergie bzw. andere regenerative Energieformen und einen verantwortungsvollen Umgang mit Wasser ein (Vgl. Braungart (2017)).

zeugen, vermindert den Kraftstoffverbrauch bei herkömmlichen Automobilen und verlängert die Reichweite von Elektroautos durch eine Reduktion des Energieverbrauchs.⁸⁴

(4) Ressourceneffiziente Trennwand

Das Unternehmen Airbus hat für Flugzeuge Trennwände entwickelt, die 45 % leichter als vergleichbare Produkte sind. Über die additive Fertigung der Trennwand sowie die Entwicklung eines leichten Legierungsmaterials können Gewicht, Kraftstoff und folglich CO₂-Emissionen pro Flugzeug um zehn Tonnen pro Jahr eingespart werden. Die Trennwände sind modular aufgebaut und können auch in bestehende Flugzeuge verbaut werden. Zudem ist das eingesetzte Material vollständig recycelbar.⁸⁵

(5) Ressourceneffizienter Abbruchhammer

Der entwickelte Abbruchhammer der Hilti AG zeichnet sich durch eine reparaturfreundliche Konstruktion aus. Verschleißteile können so auch vom Bediener gewechselt werden. Nach der Nutzungsphase kann der Anwender das Gerät an die Hilti AG zurückgeben, wo das Werkzeug einem adäquaten Recycling zugeführt wird.⁸⁶

⁸⁴ Vgl. Bundespreis-Ecodesign (2016), S. 22.

⁸⁵ Vgl. Bundespreis-Ecodesign (2016), S. 30.

⁸⁶ Vgl. Bundespreis-Ecodesign (2016), S. 53.

3.3 Methoden und Tools zur Bewertung der Ressourceneffizienz

Die Produktentwicklung beeinflusst den Lebensweg eines Produkts maßgeblich. Die daraus entstehenden Folgen können und sollten über eine ganzheitliche Bewertung abgeschätzt werden. Dazu existieren eine Vielzahl an komplexen und weniger aufwendigen Methoden und Tools (Abbildung 11, Kapitel 3.3.1).

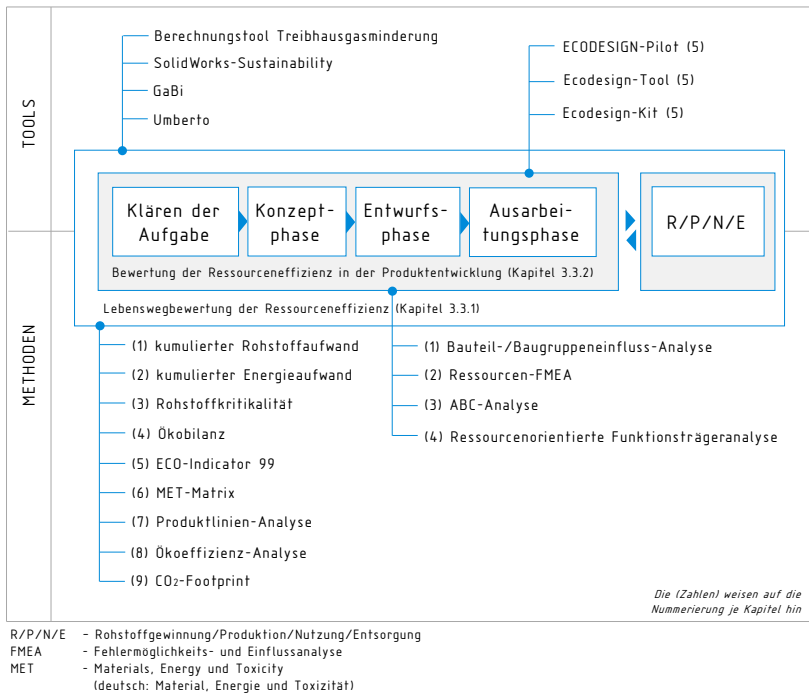


Abbildung 11: Methoden und Tools zur Bewertung der Ressourceneffizienz⁸⁷

Während des Prozesses der Produktentwicklung ermöglichen weitere Methoden die Bewertung des Status quo der Ressourceneffizienz. Diese Methoden fokussieren die Verbesserung technischer Eigenschaften, die zu einem ressourceneffizienten Produkt führen (Kapitel 3.3.2). Die genannten Tools umfassen Software und andere Hilfsmittel, die die Methoden umsetzen.

⁸⁷ In Anlehnung an VDI 2221, S. 9, VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 33 und Pahl et al. (2013), S. 17.

3.3.1 Lebenswegbewertung der Ressourceneffizienz

(1) Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) bezeichnet die „Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe – außer Wasser und Luft – ausgedrückt in Gewichtseinheiten“⁸⁸, z. B. Tonne verbrauchter Rohstoffe pro Tonne Produkt. Der Kumulierte Rohstoffaufwand umfasst also alle zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts benötigten Rohstoffe und Energierohstoffe. Diese lassen sich gruppieren in beispielsweise biotische, metallische und energetische Rohstoffe sowie Bau- und Industriemineralien. Die für die Bewertung notwendige und aggregierte Datenbasis bezieht sich dabei auf eine funktionelle Einheit⁸⁹ (z. B. 2.000 Arbeitsstunden pro Jahr). Das gewährleistet die Vergleichbarkeit bzw. definiert den Nutzen des Systems. Abbildung 12 zeigt ein Beispiel bilanzierter Kumulierter Rohstoffaufwände für zwei verschiedene Energiespeichertechnologien in einem gleich definierten Untersuchungsrahmen.⁹⁰

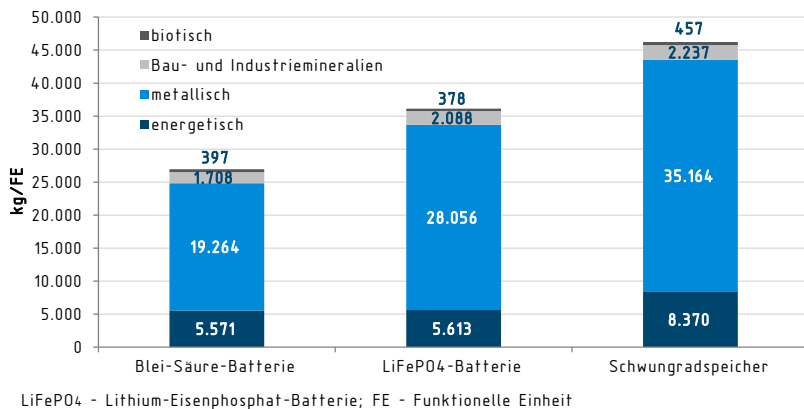


Abbildung 12: Beispiel: Kumulierter Rohstoffaufwand von Energiespeichertechnologien⁹¹

⁸⁸ Giegerich et al. (2012), S. 22.

⁸⁹ Die funktionelle Einheit ist der quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.

⁹⁰ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).

⁹¹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).

Die Anwendung der Methode ist komplex und erfordert eine fundierte Datenbasis, die in Datenbanken wie der freizugänglichen Datenbank ProBas des Umweltbundesamtes⁹² oder der lizensierungspflichtigen Datenbank ecoinvent zur Verfügung gestellt wird (Tabelle 3).

Tabelle 3: Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Kumulierten Rohstoffaufwands

Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung des Rohstoffaufwands über den gesamten Lebensweg eines Produkts oder einer Dienstleistung
Komplexität der Methode	hoch
Tools zur Anwendung der Methode	u. a. Umberto NXT®, GaBi®, SolidWorks ® Sustainability Datenbanken: ProBas (www.probas.umweltbundesamt.de), ecoinvent

(2) Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) ist definiert als „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung entsteht“⁹³. Der Kumulierte Energieaufwand ist demnach die Summe aus der benötigten Energie der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts oder einer Dienstleistung. Zusätzlich kann er in Primärenergieträger gruppiert werden.

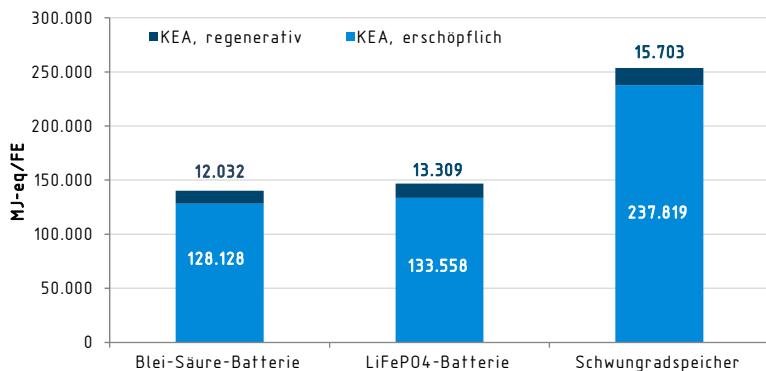
KEA, erschöpflich: KEA-fossil, KEA-nuklear
 KEA, regenerativ: KEA-Biomasse, KEA-Wind, KEA-Sonne,
 KEA-Wasserkraft

Die Bilanzierung des Kumulierten Energieaufwands erfordert ebenfalls eine fundierte Datenbasis, die auf eine funktionelle Einheit, also die Vergleichseinheit, zu beziehen ist. Im Ergebnis steht ein Energieaufwand, der z. B. in Megajoule je funktioneller Einheit ausgegeben wird. In Abbildung 13 ist der kumulative Energieaufwand beispielhaft für den Vergleich von drei Energiespeichertechnologien für einen definierten Untersuchungsrahmen dargestellt.⁹⁴

⁹² Link zur Datenbank ProBas: www.probas.umweltbundesamt.de

⁹³ VDI 4600 (2012), S. 6.

⁹⁴ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).



LiFePO₄ - Lithium-Eisenphosphat-Batterie; FE - Funktionelle Einheit

Abbildung 13: Beispiel: Kumulierter Energieaufwand von Energiespeichertechnologien⁹⁵

Auch die Berechnung des KEA ist durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet. Mögliche softwarebasierte Anwendungstools sind in Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Kumulierten Energieaufwands

Merkmale	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung des Energieaufwands über den gesamten Lebensweg eines Produkts oder einer Dienstleistung
Komplexität der Methode	hoch
Tools zur Anwendung der Methode	u. a. Umberto NXT®, GaBi®, SolidWorks®, Sustainability Datenbanken: ProBas (www.probas.umweltbundesamt.de), ecoinvent

(3) Bewertung der Rohstoffkritikalität

Kritische Rohstoffe sind Rohstoffe, von denen die Wirtschaft stark abhängig ist und die geologischen, strukturellen und geopolitischen Versorgungsrisiken unterliegen.⁹⁶

Die Bewertung der Rohstoffkritikalität ermöglicht die Einschätzung der sogenannten Verletzbarkeit eines Bezugssystems (z. B. eines Unternehmens) gegenüber Versorgungsengpässen bestimmter Rohstoffe.⁹⁷

⁹⁵ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).

⁹⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2015), S. 8.

⁹⁷ Vgl. VDI 4800, Blatt 2, Entwurf (2016), S. 8.

Die Bestimmung der Rohstoffkritikalität ist entsprechend der VDI 4800, Blatt 2 an insgesamt 16 Kriterien gebunden, die drei Kategorien zugeordnet sind (Abbildung 14).

	Kategorie 1 geologische, technische und strukturelle Kriterien	Kategorie 2 geopolitische und regulatorische Kriterien	Kategorie 3 ökonomische Kriterien
KRITERIEN	statische Reichweite	Länderkonzentration der Reserven	Unternehmenskonzentration der globalen Produktion
	Koppelproduktion/ Nebenproduktion	Länderkonzentration der Produktion	globaler Nachfrageimpuls
	Recycling	geopolitische Risiken der Weltproduktion	Substituierbarkeit
	logistische Beschränkungen	regulatorische Situation der Weltproduktion	Rohstoffpreisschwankungen
	Beschränkungen durch Naturereignisse		

Abbildung 14: Drei Kategorien und 13 Kriterien der Rohstoffkritikalitätsbewertung⁹⁸

Die Kriterien werden über Indikatoren, z. B. das Verhältnis von Reserven zur globalen Jahresproduktion, für die statische Reichweite bewertet. Der Wertebereich der Indikatoren ist dabei in vier Klassen unterteilt (Abbildung 15).⁹⁹

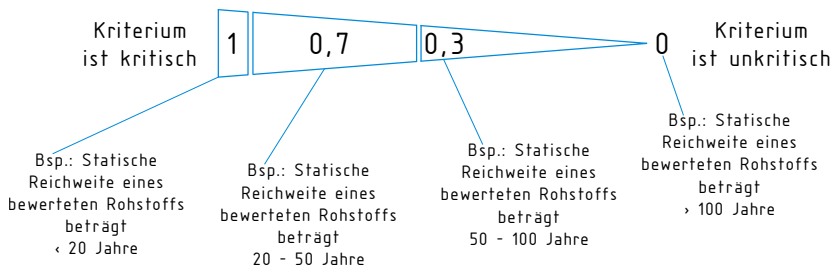


Abbildung 15: Wertebereich zur Bewertung der Rohstoffkritikalität¹⁰⁰

⁹⁸ Vgl. VDI 4800, Blatt 2, Entwurf (2016), S. 9.

⁹⁹ Vgl. VDI 4800, Blatt 2, Entwurf (2016), S. 9.

¹⁰⁰ In Anlehnung an VDI 4800, Blatt 2, Entwurf, (2016), S. 9.

Die Richtlinie VDI 4800 Blatt 2 bietet bereits Rohstoffdatenblätter an, die eine Bewertung der Kritikalität des Versorgungsrisikos ausgewählter Rohstoffe vornehmen. Stehen solche Informationen nicht zur Verfügung, muss jedes Kriterium einzeln bewertet werden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Rohstoffkritikalität

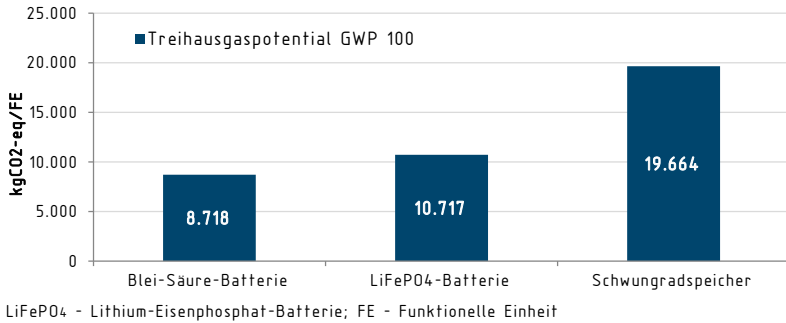
Merkmals	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung des Versorgungsrisikos und der Vulnerabilität eines Rohstoffs
Komplexität der Methode	mittel bis hoch
Tools zur Anwendung der Methode	keine Anwendungstools verfügbar

(4) Ökobilanz

Die internationalen Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beschreiben die Grundlagen und Anforderungen der Ökobilanz. Sie ist definiert als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output-Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“¹⁰¹. Input-Flüsse wie Energie, Roh- und Hilfsstoffe sowie Output-Flüsse wie Abfälle und Emissionen werden über den Produktlebensweg bilanziert. Mithilfe der Daten errechnen sich verschiedene Wirkungskategorien, wie der abiotische Ressourcenverbrauch, das Versauerungspotenzial, das Eutrophierungspotenzial oder das Treibhausgaspotenzial, die eine Aussage über die ganzheitliche Umweltbelastung entlang dem Lebensweg treffen. In Abbildung 16 ist beispielhaft das Treibhausgaspotenzial dargestellt, also die Menge an Kohlstoffdioxidemissionen, verschiedener Energiespeichertechnologien, die innerhalb eines festgelegten Untersuchungsrahmens bilanziert wurden.¹⁰²

¹⁰¹ DIN EN ISO 14040 (2009), S. 7.

¹⁰² Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).



LiFePO₄ - Lithium-Eisenphosphat-Batterie; FE - Funktionelle Einheit
Abbildung 16: Beispiel: Treibhausgaspotenzial von Energiespeichertechnologien¹⁰³

Die Vergleichbarkeit muss wie beim KEA und KRA über eine funktionelle Einheit, also eine Vergleichseinheit, gewährleistet sein. Die Datenbasis für die komplexen Berechnungen kann ebenfalls Datenbanken wie ecoinvent oder ProBas entnommen werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Ökobilanz

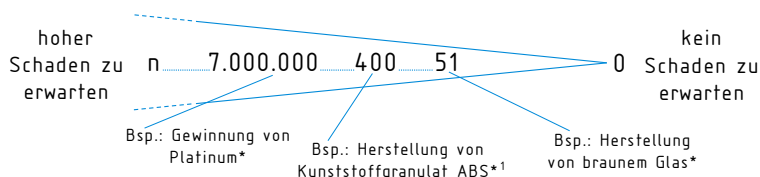
Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung der Umweltbelastung über den gesamten Lebensweg eines Produktsystems, wie beispielsweise Kohlenstoffdioxidemissionen (Treibhausgaspotenzial)
Komplexität der Methode	hoch
Tools zur Anwendung der Methode	u. a. Umberto NXT®, GaBi®, SolidWorks®, Sustainability Datenbanken: ProBas (www.probas.umweltbundesamt.de), ecoinvent

(5) ECO-Indicator 99

Der Eco-Indicator 99 ist eine Methode zur Abschätzung der schadensorientierten Wirkung von Umwelteinflüssen, die durch ein Produkt bzw. ein Produktsystem entlang dem gesamten Lebensweg verursacht werden. Die Bewertung erfolgt dabei in drei Schadenskategorien. Es wird also der Schaden quantifiziert, der den Kategorien Humangesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcenvorrat durch das Produkt bzw. das Produktsystem zugeführt wird.

¹⁰³ In Anlehnung an VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017).

Die komplexe Methodik errechnet eine Kennzahl. Je höher diese liegt, desto höher ist der Schaden in den drei Schadenskategorien, den das Produkt verursacht (Abbildung 17).¹⁰⁴



* Werte stammen aus dem Jahr 2000
 1 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (thermoplastische Terpolymere)

Abbildung 17: Kennzahlen als Ergebnis des Eco-Indicator99¹⁰⁵

Diese Kennzahl basiert auf drei Schritten:

- (1) Eine Datenbasis der relevanten Emissionen, beanspruchten Ressourcen und Landnutzungen muss recherchiert werden,
- (2) eine Berechnung der Schäden, die diese Material- und Energieflüsse verursachen, muss erfolgen und
- (3) eine Gewichtung der drei Schadenskategorien resultiert in der Kennzahl des Eco-Indicators99.

Die Berechnungen, insbesondere des zweiten Schritts, können über gängige Softwarelösungen erfolgen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Ziel, Komplexität und Anwendungstools des Eco-Indicator99

Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung einer Kennzahl über die durch das Produkt verursachte Schadenshöhe
Komplexität der Methode	mittel bis hoch
Tools zur Anwendung der Methode	u. a. Umberto NXT®, GaBi®, SolidWorks®, Sustainability Datenbanken: ProBas (www.probas.umweltbundesamt.de), ecoinvent

¹⁰⁴ Vgl. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000), S. 7.

¹⁰⁵ In Anlehnung an Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000), S. 38 ff.

(4) MET-Matrix

Die MET-Matrix (M: Materialfluss, E: Energieverbrauch, T: toxische Emissionen) ist eine qualitative Methode zur Ermittlung von Ressourcenverbräuchen im Produktlebensweg. Diese Methode kann beispielsweise während der Phase der Ideensammlung oder auch der Konzeptphase angewandt werden.¹⁰⁶ Tabelle 8 veranschaulicht den Aufbau einer MET-Matrix.

Tabelle 8: MET-Matrix¹⁰⁷

	Prozess	Materialfluss (Input/Output)	Energieverbrauch (Input/Output)	Toxische Emissionen (Output)
Rohmaterialgewinnung	1	Identifikation der Rohstoffe des Produkts bzw. des Produktsystems.	Energie, die u. a. für die Gewinnung, Bearbeitung und den Transport der Rohstoffe notwendig ist.	Identifikation der potenziell gefährlichen Rohstoffe sowie Abfall, der während der Rohmaterialgewinnung erzeugt wird.
	2			
	...			
Produkt herstellung	1	Identifikation der Materialien, die für die Produktion benötigt werden.	Bewertung des Energieverbrauchs, der für die Produktion notwendig ist.	Identifikation und Quantifizierung von Emissionen, die durch die Produktion resultieren; Identifikation von Verpackungsabfall.
	2			
	...			
Nutzung	1	Identifikation von Materialien, die für die Nutzung benötigt werden.	Bewertung der Energie, die in der Nutzungsphase notwendig ist.	Identifikation und Quantifizierung von Abfall, der durch die Nutzungsphase resultiert.
	2			
	...			
Verwertung/ Entsorgung	1	Identifikation von Materialien, die für die Entsorgung benötigt werden.	Bewertung der Energie, die für die Entsorgung/Verwertung des Produkts notwendig ist.	Identifikation und Quantifizierung von Abfall, der während der Verwertung/Entsorgung entsteht (inklusive recycelter bzw. wiederverwendeter Materialien).
	2			
	...			

Die Vorgehensweise ist relativ simpel, während der Überblick, den die MET-Matrix bietet, schnelle Schlussfolgerungen bezüglich der Wirkung des Produkts bzw. Produktsystems auf die Kategorien Materialfluss, Energieverbrauch und toxische Emissionen ermöglicht (Tabelle 9).

¹⁰⁶ Vgl. VDI 4801, Entwurf (2016), S. 26.

¹⁰⁷ In Anlehnung an eco3e (2017) und VDI 4801, Entwurf (2016), S. 26.

Tabelle 9: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der MET-Matrix

Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Qualitative und quantitative Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts bzw. eines Produktsystems
Komplexität der Methode	gering
Tools zur Anwendung der Methode	keine Tools notwendig

(5) Produktlinien-Analyse (PLA)

Die Produktlinien-Analyse ist eine weitere Methode zur Evaluierung der Umweltwirkungen eines Produkts. Zusätzlich werden bei dieser Methode auch die ökonomischen und sozialen Wirkungen betrachtet. Dazu wird analog zur MET-Methode eine Produktlinienmatrix erstellt, deren zu untersuchende Kriterien im Vorfeld festgelegt werden (Tabelle 8). Die Auswahl von Untersuchungskriterien erfolgt aus den drei Bereichen Natur, Gesellschaft und Wirtschaft (Tabelle 10).

Tabelle 10: Untersuchungskriterien aus den Bereichen Natur, Gesellschaft und Wirtschaft¹⁰⁸

Untersuchungskriterien		
Ökologische Kriterien	Ökonomische Kriterien	Soziale Kriterien
<ul style="list-style-type: none"> • Energieaufwand • Rohstoffverbrauch • Luftbelastung • Belastung von Grundwasser, Oberflächenwasser und Meeren • Schadstoffeintrag in den Boden • Dezimierung und Ausrottung von Pflanzen und Tieren • Beeinflussung von Biotopen und Ökosystemen • Klimaveränderung, Gefährdung der Ozonschicht, saurer Regen • Radioaktivität und Strahlenbelastung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Preis • Messbare Qualität • Subjektive Qualität • Werbung/Marketing • Marktmacht • Individuelle Kosten • Externe Kosten (Folgekosten) • Wirtschaftliche Abhängigkeit • Verteilungswirkung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsqualität • Arbeitszufriedenheit • Arbeitsunfälle • Schadstoffbelastung am Arbeitsplatz • Gesundheitsverträglichkeit des Produkts • Allgemein soziale Werte, wie Betriebsicherheit, Versorgungssicherheit, Selbstbestimmung • Rechtlich sanktionierte Werte wie Chancenausgleich oder Freiheit von Arbeitszwang •

¹⁰⁸ Österreicher (k. A.), S. 10 f.

Für die Produktlinien-Analyse existiert keine exakt festgelegte Vorgehensweise. Für jedes gewählte Kriterium ist pro Lebenszyklusphase eine adäquate Information zu recherchieren, die nachvollziehbar und transparent zu dokumentieren ist. Die weitere qualitative Bewertung ist danach abhängig vom Anwender.¹⁰⁹

Tabelle 11: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Produktlinien-Analyse

Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Qualitative und quantitative Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts bzw. eines Produktsystems
Komplexität der Methode	mittel
Tools zur Anwendung der Methode	keine Tools notwendig

(6) Ökoeffizienz-Analyse

Die Ökoeffizienz-Analyse zeigt das Verhältnis zwischen der ökonomischen Wertschöpfung und der ökologischen Schadschöpfung eines Produkts oder eines Verfahrens. Verschiedene Kennzahlen können für die Ökoeffizienz-Analyse herangezogen werden. Für die ökologische Dimension können dies beispielsweise CO₂-Emissionen oder der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) sein, für die ökonomische Dimension z. B. der Return on Invest oder der Deckungsbeitrag (Abbildung 18).¹¹⁰

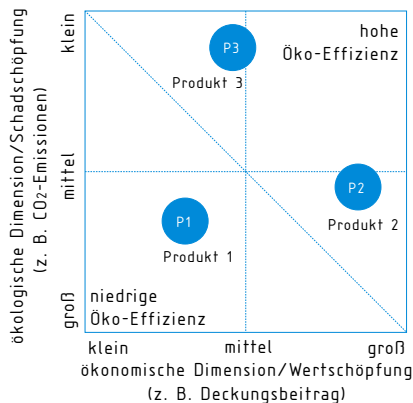


Abbildung 18: Beispielhafte Ergebnisdarstellung der Ökoeffizienz-Analyse

¹⁰⁹ Vgl. Österreicher (k. A.), S. 10.

¹¹⁰ Vgl. Schaltegger et al. (2007), S. 109.

Die Ökoeffizienz-Analyse unterstützt bei Investitionsentscheidungen, optimiert Produkte hinsichtlich ökologischer Aspekte oder zeigt eine mögliche strategische Ausrichtung des Produktportfolios auf zukunftsfähige Produkte (Tabelle 12).¹¹¹

Tabelle 12: Ziel, Komplexität und Anwendungstools für die Ökoeffizienz-Analyse

Merkmals	Ausprägung
Ziel der Methode	Unterstützung bei Investitionsentscheidungen, Bewertung der ökologischen Performance eines Produkts
Komplexität der Methode	hoch
Tools zur Anwendung der Methode	Für die ökologische Dimension können Umberto NXT®, GaBi® und SolidWorks®, Sustainability etc. hilfreich sein.

(7) CO₂-Footprint bzw. CO₂-Bilanz

Die CO₂-Bilanz berechnet die gesamten Kohlenstoffdioxid-Emissionen über den ganzen Lebensweg, die durch ein Produkt bzw. ein Produktsystem verursacht werden. Es können entweder nur Kohlenstoffdioxid-Emissionen betrachtet oder auch andere Emissionen inkludiert werden, die in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden.

Die CO₂-Bilanz lässt sich für verschiedene Untersuchungsgrenzen anfertigen, wie pro Person, pro Unternehmen, pro Stadt, pro Land oder pro Tätigkeit. Dazu stehen einige frei zugängliche Anwendungstools zur Verfügung (Tabelle 13).

Tabelle 13: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der CO₂-Bilanzierung

Merkmals	Ausprägung
Ziel der Methode	Ermittlung der gesamten CO ₂ -Emissionen eines Produkts bzw. eines Produktsystems
Komplexität der Methode	mittel
Tools zur Anwendung der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnungstool Treibhausgas-Minderung der Energieagentur NRW (Link: www.energieagentur.nrw/klimaschutz/co2/berechnungstool_treibhausgas-minderung) • u. a. auch Umberto NXT®, GaBi®, SolidWorks®, Sustainability bzw. Datenbanken ProBas oder ecoinvent

¹¹¹ Vgl. Schaltegger et al. (2007), S. 109.

3.3.2 Bewertung der Ressourceneffizienz innerhalb der Grenzen des Produktentwicklungsprozesses

Die Verbesserung der Ressourceneffizienz eines Produkts bzw. eines Produktsystems erfordert bereits eine Beachtung und Anwendung von Strategien in der Produktentwicklungsphase (Kapitel 3.2). Folgend werden verschiedene Methoden vorgestellt, die eine Erschließung von Ressourceneffizienz-Potenzialen in der Produktentwicklungsphase unterstützen. Weitere Methoden, die die Ressourceneffizienz in der Produktentwicklungsphase adressieren, können z. B. dem Ressourcensparbuch des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA)¹¹² entnommen werden.

(1) Bauteil-/Baugruppen-Einfluss-Analyse

Die Bauteil-/Baugruppen-Einfluss-Analyse ist eine Verfahrensweise zur Identifikation konstruktiver Materialeffizienzpotenziale. Es wird dabei ermittelt, bei welchen Bauteilen/Baugruppen hohe Potenziale zur Reduktion konstruktiver bzw. produktionstechnischer Materialverschwendungen bestehen. Diese können dann einer weiteren Optimierungsschleife unterliegen.

Dazu können einfache Formblätter und Bewertungsskalen genutzt werden. Eine 0-1-3-9-Bewertungsskala bietet eine Möglichkeit, die Höhe des Einflusses einer Baugruppe auf den Ressourcenbedarf zu ermitteln (Tabelle 14).¹¹³

Tabelle 14: Beispiel einer Baugruppen-Einfluss-Analyse-Matrix¹¹⁴

Prozess	Ressource	Baugruppen		
		Baugruppe I	Baugruppe II	Baugruppe III
Prozess a	Ressource 1	0	1	3
	Ressource 2	3	9	1
Prozess b	...	1	1	9
	...	0	1	9
Gesamtwert		4	12	22

0 = kein Einfluss auf Ressourcenaufwand

1 = geringer Einfluss auf Ressourcenaufwand

3 = mittlerer Einfluss auf Ressourcenaufwand

9 = hoher Einfluss auf Ressourcenaufwand

¹¹² Vgl. VDMA (2016).

¹¹³ Vgl. VDMA (2016), S. 71.

¹¹⁴ In Anlehnung an VDMA (2016), S. 72.

Die Summe bzw. der Gesamtwert gibt Auskunft über die Baugruppe mit dem höchsten potenziellen Einfluss auf den Ressourcenaufwand und zeigt, bei welchen Baugruppen Ressourceneffizienz-Maßnahmen (Tabelle 15, Kapitel 3.2) erfolgversprechend sind. Im Fall des Beispiels in Tabelle 14 sollte die Baugruppe III hinsichtlich Ressourceneffizienz-Maßnahmen genauer betrachtet werden.

Tabelle 15: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Baugruppen-Einfluss-Analyse

Merkmal	Ausprägung
Ziel der Methode	Identifikation der Baugruppen/Bauteile mit dem höchsten Ressourceneffizienzpotenzial und Überarbeitung dieser in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase
Komplexität der Methode	mittel
Tools zur Anwendung der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Formblätter, • Datenverarbeitungsprogramme wie Excel

(2) Ressourcen-Fehlermöglichkeits- und -einfluss-Analyse (Ressourcen-FMEA)

Die **Fehlermöglichkeits- und -einfluss-Analyse (FMEA)** zielt auf eine Fehleridentifikation in einem frühen Stadium der Produkt- und Prozessentwicklung ab. Dadurch kann kostenintensiven Fehlerbeseitigungen während des Produktionsprozesses bzw. der Produktnutzung schon in der Entwicklungsphase vorgebeugt werden.¹¹⁵

Die **Ressourcen-Fehlermöglichkeits- und -einfluss-Analyse (Ressourcen-FMEA)** stellt eine Weiterentwicklung der klassischen FMEA dar. Anstelle möglicher Fehler werden Engpässe der vorgelagerten Wertschöpfungskette für das Unternehmen erfasst. Mit der Ressourcen-FMEA sollen Maßnahmen festgelegt werden, die das Versorgungsrisiko betrachteter Ressourcen mindern.¹¹⁶

Nach dem Ressourcensparbuch des VDMA erfolgt die Durchführung einer Ressourcen-FMEA in sieben Teilschritten: der Vorbereitung, der Engpass-Analyse, der Risikobeurteilung, der Maßnahmendefinition, der Auswertung

¹¹⁵ Vgl. Theden und Colsman (2013), S. 78 – 89.

¹¹⁶ Vgl. VDMA (2016), S. 93.

und Entscheidung, der Neubewertung nach Maßnahmenumsetzung sowie der Nachbereitung (Abbildung 19).

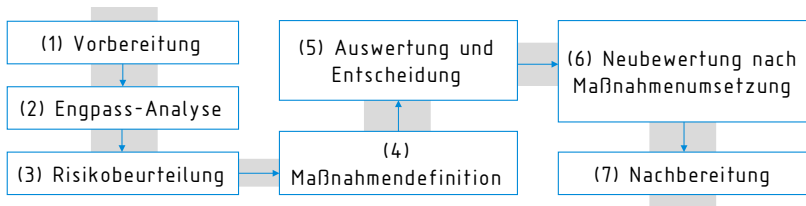


Abbildung 19: Ablauf einer Ressourcen-FMEA¹¹⁷

Insbesondere in der Vorbereitungsphase werden potenziell kritische Rohstoffe vorausgewählt (1). Dazu kann beispielsweise die Methode der Ermittlung der Rohstoffkritikalität hilfreich sein (Kapitel 3.3.1, (3)). Die Engpass-Analyse listet und bewertet alle möglichen Engpässe für die gewählten Rohstoffe (2). Engpässe sind z. B. eine eingeschränkte Verfügbarkeit oder Handelshemmnisse. Die potenziellen Engpässe werden anschließend nach ihrem Risiko, also ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit, bewertet (3). Darauf aufbauend werden für die Ressourcen mit dem höchsten Engpassrisiko Maßnahmen abgeleitet, die hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Abwägen des Nutzens zum Aufwand) beurteilt und im Fall einer positiven Evaluation ausgewählt werden (4,5). Nach der Umsetzung erfolgen eine weitere Situationsbewertung und eine Anpassung der Maßnahmenumsetzung, wenn dies notwendig ist. Die Nachbereitung sieht eine Dokumentation des komplexen Ablaufs der Ressourcen-FMEA vor, damit für ähnliche bzw. folgende Projekte der hohe Aufwand verringert werden kann (6, 7, Tabelle 16).¹¹⁸

Tabelle 16: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Ressourcen-FMEA

Merkmals	Ausprägung
Ziel der Methode	Identifikation von Ressourcenengpässen in der vorgelagerten Wertschöpfungskette und Ableiten von Maßnahmen zur Verringerung des Versorgungsrisikos
Komplexität der Methode	hoch
Tools zur Anwendung der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Formblätter • Datenverarbeitungsprogramme wie Excel

¹¹⁷ Vgl. VDMA (2016), S. 93.

¹¹⁸ Vgl. VDMA (2016), S. 94 ff.

(3) ABC-Analyse

Die ABC-Analyse stellt ein einfaches Instrument zur Abgrenzung wesentlicher und unwesentlicher Stoffe bzw. Ressourcen innerhalb eines Betrachtungssystems dar. Die Klassifizierung bzw. Priorisierung mit den Buchstaben A, B und C erfolgt in Bezug auf eine Fragestellung bzw. ein daraus abgeleitetes Kriterium, z. B. die zu verbauende Ressourcenmenge im Produkt, die Kosten der Ressourcen oder das Versorgungsrisiko der Ressourcen. Dabei hat Klasse A die höchste und Klasse C die geringste Priorität (Tabelle 17).

- A = sehr wichtig/sehr problematisch → dringender Optimierungsbedarf
- B = wichtig/problematisch → Optimierungsbedarf ratsam
- C = unwichtig/unproblematisch → kein/geringer Optimierungsbedarf.¹¹⁹

Im Ergebnis kann eine ABC-Analyse die geplanten Werkstoffe den abgeleiteten Kriterien gegenüberstellen und daraus mitunter Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Neuwahl von beispielsweise biobasierten Werkstoffen ziehen.

Tabelle 17: Beispiel einer ABC-Analyse¹²⁰

Rohstoff	Bewertungskriterium		
	Benötigte Menge je Produkt	Rohstoffkosten je Produkt	Versorgungskritikalität
Rohstoff 1	C	A	A
Rohstoff 2	A	B	B
Rohstoff 3	A	C	B

Die Ergebnisse der ABC-Analyse müssen auf die jeweilige Situation bezogen und abgewogen werden. Eine weitere, detailliertere Analyse kann im nächsten Schritt noch offene Fragestellungen beantworten (Tabelle 18).

¹¹⁹ Vgl. Schaltegger et al. (2007), S. 51.

¹²⁰ In Anlehnung an Schaltegger et al. (2007), S. 51.

Tabelle 18: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der ABC-Analyse

Merkmals	Ausprägung
Ziel der Methode	Identifikation von wesentlichen Einflussfaktoren (z. B. Rohstoffmenge) auf den Ressourcenaufwand
Komplexität der Methode	gering
Tools zur Anwendung der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Formblätter • Datenverarbeitungsprogramme wie Excel

(4) Ressourcenorientierte Funktionsträger-Analyse

Die Funktionsträger-Analyse analysiert Bauteile und Baugruppen eines Produkts und bewertet deren Funktion hinsichtlich ihrer Wichtigkeit bzw. Notwendigkeit. Es lassen sich Potenziale zur Minderung eingesetzter bzw. geplanter Ressourcen identifizieren und unnötigen Bauteilen bzw. ineffizienten Ressourceneinsätzen kann entgegengewirkt werden. Der Ablauf einer Funktionsträger-Analyse erfolgt in sechs Schritten (Abbildung 20).¹²¹

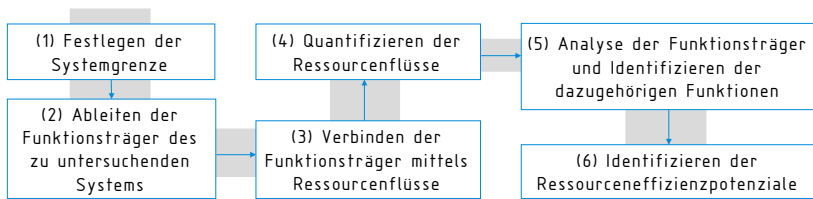


Abbildung 20: Ablauf einer ressourcenorientierten Funktionsträger-Analyse¹²²

Die Festlegung des Betrachtungsrahmens erfolgt durch die Definition der Systemgrenze (1), was sich auf ein gesamtes Produkt oder auch nur auf Produktkomponenten beziehen kann. Diese werden in ihre Funktionsträger bzw. in ihre Baugruppen/Bauteile unterteilt (2), dann werden jeweils die Ein- und Ausgangsressourcenflüsse (z. B. Stoffe, Energie oder Signale) ermittelt und miteinander verbunden (3). Daraus leiten sich dann u. a. die zu optimierenden Ressourcenflüsse ab, wie beispielsweise Abwärme oder Verschnitt.

¹²¹ Vgl. VDMA (2016), S. 110.

¹²² In Anlehnung an VDMA (2016), S. 109.

Die Ressourcenflüsse werden anschließend quantifiziert (4) und die funktionalen Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsressourcenflüssen der Funktionsträger beleuchtet ((5), Abbildung 21).¹²³

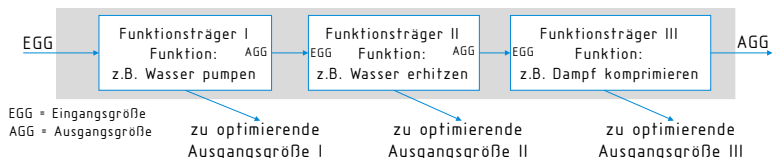


Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Funktionsträger-Analyse¹²⁴

Aus den quantifizierten Ressourcenflüssen und den funktionalen Zusammenhängen lassen sich so weitere mögliche Ressourceneffizienzpotenziale ableiten bzw. Aussagen zu unnötigen oder mit effizienteren Funktionen versehenen Funktionsträgern treffen ((6), Tabelle 19).

Tabelle 19: Ziel, Komplexität und Anwendungstools der Funktionsträger-Analyse

Merkmale	Ausprägung
Ziel der Methode	Verringerung des eingesetzten Ressourcenaufwands durch Ermittlung unnötiger Bauteile
Komplexität der Methode	mittel
Tools zur Anwendung der Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Formblätter • Datenverarbeitungsprogramme wie Excel

(5) Tools zur Produktgestaltung

Neben den Strategien zur Bewertung und Analyse von Ressourceneffizienz in der Produktentwicklung bieten sich weitere Tools an, die während der Entwicklungsphase eingesetzt werden können.

Dazu zählt der **ECODESIGN Pilot** des Instituts für Konstruktionswissenschaften der Technischen Universität Wien. Es handelt sich um ein softwaregestütztes, kostenloses Tool, das Produktentwickler bzw. Konstrukteure dabei unterstützen soll, umweltfreundliche und ressourceneffiziente Strategien in den Produktentwicklungsprozess einzubinden.¹²⁵

¹²³ Vgl. VDMA (2016), S. 110 – 114.

¹²⁴ In Anlehnung an VDMA (2016), S. 116.

¹²⁵ Vgl. Ecodesign Pilot (2017g).

- Internetadresse: www.ecodesign.at

Ein anderes internetbasiertes Tool ist das **Ecodesign-Kit** des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes. Es wird als Werkzeugkasten aus 36 Themenpapieren verstanden, die in fokussierter Form Grundlagen, Methoden und Praxisbeispiele rund um das Thema ressourceneffiziente und umweltfreundliche Produktentwicklung anbieten.¹²⁶

- Internetadresse: www.ecodesignkit.de

Das **ECO DESIGN TOOL** stellt eine qualitative Entscheidungsstütze im Produktgestaltungsprozess dar. Den Themenbereichen Nutzen, Material und Realisation werden ökologisch relevante Aspekte zugeordnet, wie beispielsweise Nutzungsdauer, Lebensdauer oder Trennbarkeit. Über ein Kartensystem können die dargestellten Aspekte miteinander verknüpft werden und ermöglichen so eine mehrdimensionale Betrachtung.¹²⁷

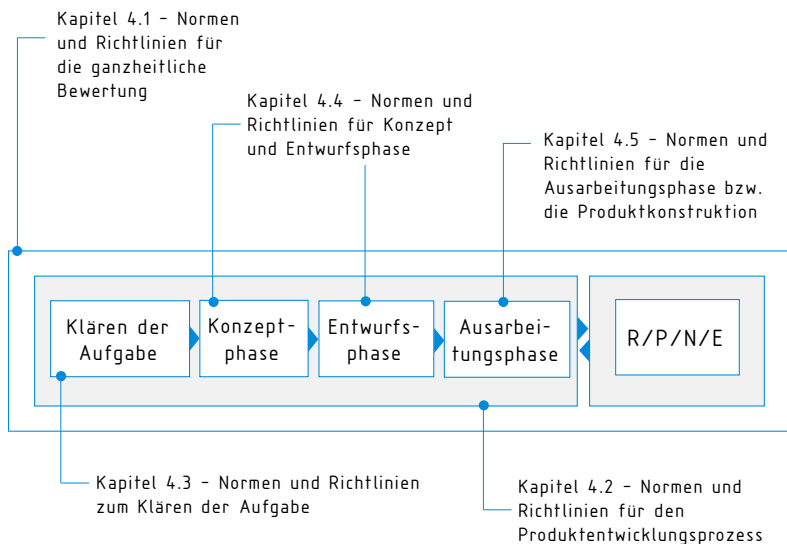
- Internetadresse: www.ecodesigntool.com

¹²⁶ Vgl. Ecodesign Kit (2017).

¹²⁷ Vgl. Ecodesign Tool (2017).

4 NORMEN UND RICHTLINIEN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER PRODUKTENTWICKLUNG

Normen und Richtlinien können beim Produktentwicklungsprozess unterstützend wirken. Sie können für die einzelnen Phasen, vom Klären der Aufgabe bis zur Ausarbeitungsphase, für den gesamten Produktentwicklungsprozess und ebenso für die ganzheitliche Bewertung angewandt werden. In Kapitel 4.1 wird die Ressourceneffizienz im Rahmen der ganzheitlichen Bewertung adressiert. Die übrigen Kapitel 4.2 bis 4.5 umfassen zwar Richtlinien ohne Ressourceneffizienz-Bezug, sind aber vollständigheitshalber und um das Thema abzurunden mit aufgeführt (Abbildung 22).



R/P/N/E - Rohstoffgewinnung/Produktion/Nutzung/Entsorgung

Abbildung 22: Kapitelübersicht zu Normen und Richtlinien¹²⁸

¹²⁸ In Anlehnung an VDI 2221 (1993), S. 9, VDI 4800 Blatt 1 (2016), S. 33 und Pahl et al. (2013), S. 17.

4.1 Normen und Richtlinien für die ganzheitliche Bewertung

Tabelle 20 listet Normen und Richtlinien, die Anforderungen und Grundsätze von Methoden zur ganzheitlichen Bewertung beschreiben, wie den Kumulierten Rohstoff- oder den Kumulierten Energieaufwand.

Tabelle 20: Normen und Richtlinien zur lebenswegorientierten Bewertung

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien der lebenswegorientierten Bewertung: Titel und Inhalt
VDI 4800 Blatt 1	<p>Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien</p> <p>Die VDI-Richtlinie beinhaltet die Grundlagen sowie Prinzipien der Lebenswegbewertung und Strategien, die ein ressourceneffizientes Handeln unterstützen.</p>
VDI 4800 Blatt 2	<p>Ressourceneffizienz, Bewertung des Rohstoffaufwands</p> <p>Die VDI-Richtlinie umfasst die Methodik zur Ermittlung des Kumulierten Rohstoffaufwands (KRA), des Wasser- sowie Flächenaufwands und der Bewertung der Rohstoffkritikalität, wozu die Vulnerabilität und das Versorgungsrisiko zählen (Kapitel 3.3.1 (1)).</p>
VDI 4600	<p>Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden</p> <p>Die VDI-Richtlinie beschreibt die Methodik zur Bilanzierung des Kumulierten Energieaufwands, also des Energieaufwands, der für ein Produkt bzw. Produktsystem entlang dem gesamten Lebensweg benötigt wird (Kapitel 3.3.1 (2)).</p>
VDI 4600 Blatt 1	<p>Kumulierter Energieaufwand – Beispiele</p> <p>Die VDI-Richtlinie zeigt Beispiele zur Ermittlung des Kumulierten Energieaufwands anhand von z. B. Photovoltaikmodulen oder eines Offshore Windparks.</p>
DIN EN ISO 14040	<p>Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen</p> <p>Die Norm vermittelt Grundsätze und Rahmenbedingungen, die an das methodische Konzept der Ökobilanz geknüpft sind. Das Konzept der Ökobilanz beinhaltet die Erfassung und Bewertung von Umweltauswirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen über deren gesamten Lebensweg hinweg (Kapitel 3.3.1 (4)).</p>
DIN EN ISO 14044	<p>Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen</p> <p>Die Norm legt die Anforderungen und Verfahren fest, die für die Umsetzung einer Ökobilanz erforderlich sind (Kapitel 3.3.1 (4)).</p>
DIN EN ISO 14045	<p>Umweltmanagement – Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen – Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien</p> <p>Die Norm beschreibt die Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien der Ökoeffizienz-Analyse (Kapitel 3.3.1 (8)). Die Ökoeffizienz ermittelt das Verhältnis zwischen der ökonomischen Wertschöpfung und der ökologischen Schadschöpfung eines Produkts oder eines Verfahrens.</p>

4.2 Normen und Richtlinien für den Produktentwicklungsprozess

Tabelle 21 zeigt Richtlinien und Normen, die Informationen, Methoden und z. B. erfinderisches Problemlösen in den Grenzen des Produktentwicklungsprozesses adressieren. Die Liste der VDI-Richtlinien sowie Normen ist erweiterbar und daher nicht als abschließend zu verstehen.

Tabelle 21: Normen und Richtlinien für den Produktentwicklungsprozess

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien zum Produktentwicklungsprozess: Titel und Inhalt
VDI 2243	<p>Recyclingorientierte Produktentwicklung</p> <p>Die VDI-Richtlinie bietet Informationen, Anleitungen und Entscheidungshilfen für die Produktentwicklung zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit des Produkts.</p>
VDI 4521 Blatt 1 bis 2	<p>Erfinderisches Problemlösen mit TRIZ Blatt 1 – Grundlagen und Begriffe</p> <p>Die VDI-Richtlinie Blatt 1 liefert Beschreibungen zu den Inhalten, d. h. Grundlagen und Begriffen der TRIZ-Methode (Methode des erfinderischen Problemlösens).</p> <p>Blatt 2 – Zielbeschreibung, Problemdefinition und Lösungspriorisierung</p> <p>DIE VDI-Richtlinie Blatt 2 beschreibt Werkzeuge und Methoden der TRIZ-Verfahrensweise.</p>
DIN EN 62430 ; VDE 0042-2:2010-02	<p>Umweltbewusstes Gestalten elektrischer und elektronischer Produkte</p> <p>Die Norm beschreibt ein allgemeingültiges Verfahren, um Umweltaspekte in Gestaltungs- und Entwicklungsprozesse elektrischer und elektronischer Produkte und Systeme zu integrieren.</p>
DIN EN ISO 14006	<p>Umweltmanagementsysteme – Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung</p> <p>Die Norm adressiert produktbezogene Umweltaspekte, die durch eine Organisation überwachbar bzw. beeinflussbar sind.</p>
DIN CEN/TS 16524; DIN SPEC 33925:2013-12	<p>Mechanische Produkte – Methodik zur Verminderung der Umweltauswirkungen bei Produktgestaltung und Entwicklung</p> <p>Die Technische Spezifikation beinhaltet eine Beschreibung einer Ökodesign-Methodik, die Unternehmen zum Einsatz von Ökodesign-Kriterien zur Minimierung der Umweltwirkungen des zu entwickelnden Produkts anwenden können.</p>
VDI 2221	<p>Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte</p> <p>Die VDI-Richtlinie vermittelt u. a. die Arbeitsschritte, Arbeitsergebnisse bzw. allgemeingültige und branchenübergreifende Grundlagen des methodischen Entwickelns und Konstruierens technischer Systeme und Produkte.</p>
VDI 2206	<p>Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme</p> <p>Die VDI-Richtlinie unterstützt das methodische, domänenübergreifende Entwickeln mechatronischer Systeme. Im Fokus der Richtlinie stehen die Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge für die früheren Phasen des Entwickelns, insbesondere für die Entwurfsphase.</p>

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien zum Produktentwicklungsprozess: Titel und Inhalt
VDI 2218	<p>Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-Technologie</p> <p>Die VDI-Richtlinie gibt einen Überblick über die Feature-Technologie. Dies beinhaltet u. a. Definitionen und Beispiele für die Umsetzung der Feature-Technologien in der Praxis.</p>
VDI 2219	<p>Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Betrieb von PDM-Systemen</p> <p>Die VDI-Richtlinie beschreibt das strukturierte Vorgehen bei der Ersteinführung oder dem Wechsel von Produktdatenmanagement-Systemen (PDM-Systemen).</p>

4.3 Normen und Richtlinien zum Klären der Aufgabe

Tabelle 22 beinhaltet u. a. die VDI-Richtlinie 4070 zum nachhaltigen Wirtschaften speziell in kleinen und mittleren Unternehmen. Bereits in der Entwicklung von Managementprozessen können Nachhaltigkeitsziele fest verankert werden, die sich wiederum in den Anforderungen an das Produkt wiederfinden sollten (Kapitel 2.1.1).

Tabelle 22: Normen und Richtlinien zum Klären der Aufgabe

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien zum Klären der Aufgabe: Titel und Inhalt
VDI 4070 Blatt 1	<p>Nachhaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen – Anleitung zum nachhaltigen Wirtschaften</p> <p>Die VDI-Richtlinie formuliert eine Anleitung zur Implementierung von nachhaltigkeitsorientierten Managementprozessen speziell in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Zu den Grundsätzen zählen dabei</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anerkennung gesellschaftlicher Verantwortung, • Berücksichtigung und Ausgleich der Interessen von Anspruchsgruppen, • Transparenz, • ganzheitlicher Ansatz und • Nutzung der Instrumente des Nachhaltigkeitsmanagements.
VDI 2222 Blatt 1	<p>Konstruktionsmethodik Blatt 1 – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien</p> <p>Die VDI-Richtlinie ist eine Detaillierung und Erweiterung der Richtlinie VDI 2221 (Tabelle 21) und behandelt die Arbeitsschritte 1 bis 3, wobei Arbeitsschritt 1 das Klären und Präzisieren der Aufgabe umfasst.</p> <p>Nähere Erläuterungen in Tabelle 23 auf der folgenden Seite</p>

4.4 Normen und Richtlinien für die Konzept- und Entwurfsphase

Tabelle 23 listet Richtlinien mit Bezug zur Konzept- und Entwurfsphase. Dazu zählen die VDI 2222 Blatt 1 und die VDI 2223, die beide der Dachrichtlinie VDI 2221 angehören (Tabelle 21).

Tabelle 23: Normen und Richtlinien zur Konzept- und Entwurfsphase

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien für die Konzept- und Entwurfsphase: Titel und Inhalt
VDI 2222 Blatt 1	<p>Konstruktionsmethodik Blatt 1 – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien</p> <p>Die VDI-Richtlinie ist eine Detaillierung und Erweiterung der Richtlinie VDI 2221 (Tabelle 21) und behandelt die Arbeitsschritte 1 bis 3 u. a. der Abbildung 1 (1 - Klären der Aufgabe, 2 - Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen, 3 - Finden prinzipieller Lösungen). Es werden u. a. die Methodik und die Art der Dokumentation zur Ableitung der „Prinzipiellen Lösung“ beschrieben.</p>
VDI 2223	<p>Methodisches Entwerfen technischer Produkte</p> <p>Die VDI-Richtlinie ist eine Detaillierung und Erweiterung der Richtlinie VDI 2221 (Tabelle 21) und behandelt die Arbeitsschritte 4 bis 6 u. a. der Abbildung 1 (4 - Gliedern in realisierbare Module, 5 - Gestalten der maßgebenden Module, 6 - Gestalten des gesamten Produkts). Die Richtlinie erklärt dabei insbesondere das Entwerfen in der Feinwerktechnik und des Maschinenbaus.</p>

4.5 Normen und Richtlinien für die Ausarbeitungsphase

Tabelle 24 zeigt Richtlinien und Normen, die sich mit der Ausarbeitungsphase befassen. Dazu zählen u. a. die Methodik des Konstruierens – generell und in verschiedenen Branchen – als auch wirtschaftsorientierte Grundlagen.

Tabelle 24: Normen und Richtlinien zur Ausarbeitungsphase

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien für die Ausarbeitungsphase: Titel und Inhalt
VDI 2209	<p>3-D-Produktmodellierung – Technische und organisatorische Voraussetzungen – Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen – Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis</p> <p>Die VDI-Richtlinie beschreibt die Anwendung von 3-D-Produktmodellen, da diese folgende Vorteile gegenüber 2-D-Systemen besitzen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vollständigere Produktmodelle, • weniger einzeln zu erstellende und zu verwaltende Dokumente, da aus den 3-D-Produktmodellen viele Unterlagen (teil-)automatisch abgeleitet werden, • frühes Erkennen und Vermeiden von Problemen und folglich weniger Optimierungszyklen im Produktentwicklungsprozess.

Dokumentennummer	Normen und Richtlinien für die Ausarbeitungsphase: Titel und Inhalt
VDI 2211 Blatt 2	<p>Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Berechnungen in der Konstruktion</p> <p>Die VDI-Richtlinie beleuchtet die Berechnungsaufgaben vor und parallel zum Konstruktionsprozess eines MaschinenbaukonstruktEURs.</p>
VDI 2225 Blatt 1 bis 4	<p>Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren</p> <p>Blatt 1 Vereinfachte Kostenermittlung Diese VDI-Richtlinie beschreibt ein einfaches Rechenverfahren zur Material- und Herstellkostenabschätzung.</p> <p>Blatt 2 Tabellenwerk Diese VDI-Richtlinie hält Zahlenwerte zu relativen Materialkostenanteilen und Werkstoffkosten bereit.</p> <p>Blatt 3 Technisch-wirtschaftliche Bewertung Diese VDI-Richtlinie stellt zwei Methoden der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für die praktische Anwendung in der Konstruktion detailliert dar.</p> <p>Blatt 4 Bemessungslehre Diese VDI-Richtlinie zeigt, wie technische als auch wirtschaftliche Anforderungen bei der Auslegung zu berücksichtigen bzw. zu berechnen sind.</p>
VDI 2234	<p>Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur</p> <p>Die VDI-Richtlinie vermittelt die Grundlagen der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Konstruieren (u. a. Kurzkalkulationen, Schätzverfahren).</p>
VDI 2235	<p>Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen</p> <p>Die VDI-Richtlinie stellt Methoden und Hilfsmittel für wirtschaftliche Entscheidungen während des Konstruierens zur Verfügung.</p>
VDI 2244	<p>Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse</p> <p>Die VDI-Richtlinie beschreibt sicherheitsrelevante Einflüsse sowie deren konstruktive Berücksichtigung für alle technischen Erzeugnisse, von denen eine Gefahr für Mensch und Umwelt ausgeht.</p>
VDI 2249	<p>Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – CAD-Benutzungsfunktion</p> <p>Die VDI-Richtlinie präsentiert CAD-Systeme anhand unterschiedlicher Anwendungen im Maschinenbau, im Anlagenbau und in der Elektrotechnik.</p>

5 PRODUKTDEKLARATION UND BESCHAFFUNG

Die Produktdeklaration ist ein wesentlicher Faktor, um auf die Umweltfreundlichkeit bzw. die Ressourceneffizienz eines Produkts aufmerksam zu machen – insbesondere für die Beschaffung eines Unternehmens. Sie kann darüber hinaus im Produktentwicklungsprozess helfen, umweltfreundliche bzw. ressourceneffiziente Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt zu stellen.

Drei verschiedene Typen von Umweltkennzeichnungen und Deklarationen werden nach DIN-Normen unterschieden: Typ I, Typ II und Typ III. In Tabelle 25 sind die einzelnen Typen in Stichpunkten erläutert.

Tabelle 25: Typen von Umweltkennzeichnungen nach DIN-Normen¹²⁹

Umweltkennzeichnung	Umweltkennzeichnung und Umweltdeklaration	Deklaration
nach DIN EN ISO 14024 TYP I	Nach DIN EN ISO 14021 TYP II	Nach DIN EN ISO 14025 TYP III
<ul style="list-style-type: none"> wenden sich an private und gewerbliche Verbraucher weisen eine besondere Umweltqualität aus sind relevant für die öffentliche Beschaffung haben eine hohe Glaubwürdigkeit und sind meist sehr bekannt erfordern eine Dritt Zertifizierung beziehen interessierte Kreise mit ein 	<ul style="list-style-type: none"> wenden sich meist an Verbraucher konzentrieren sich oft auf einen einzelnen Umweltaspekt gelten im Grundsatz auch für komplexe Informationen liegen als freiwillige Selbsterklärung in alleiniger Verantwortung des Herstellers 	<ul style="list-style-type: none"> wenden sich an Hersteller in der Lieferkette, Gewerbe, Handel, weniger an Verbraucher beruhen auf einer Ökobilanz liefern umfangreiche quantitative und verifizierte Informationen stellen Umweltwirkungen dar, ohne zu werten sind für alle Produkte und Dienstleistungen geeignet ermöglichen Datenaggregation entlang einer Wertschöpfungskette erfordern eine unabhängige Verifizierung durch Dritte

Ein berühmtes Beispiel für den Typ I der Umweltkennzeichnung ist der „Blaue Engel“. Die DIN 14021 legt für den Typ II insgesamt 17 ausgewählte Begriffe fest, die auf einem Produkt aufgebracht werden können. Dazu zählen die Begriffe kompostierbar oder recyclingfähig. Weitaus komplexer sind die Deklarationen des Typ III, die in der DIN 14025 aufgelistet werden.

¹²⁹ In Anlehnung an BMUB (2014), S. 15.

Die Normenreihe ISO 14020 stellt auf internationaler Ebene eine Grundlage für produktbezogene Umweltinformationen zur Verfügung. Die Norm beschreibt das „Wie“ der Umsetzung von Umweltkennzeichnungen (Tabelle 25) und legt dazu neun Grundsätze als klare Vorgaben fest (Abbildung 23).



KORREKTE ANGABEN

Grundsatz 1: Aussagen über Umweltaspekte eines Produkts müssen genau, überprüfbar und zutreffend sein; sie dürfen nicht irreführend sein.



HANDELSHEMMNISSE VERMEIDEN

Grundsatz 2: Anforderungen an die Vergabe von Umweltaussagen und Umweltzeichen dürfen keine unnötigen Hemmnisse für den internationalen Handel schaffen.



NACHPRÜFBARE METHODEN

Grundsatz 3: Aussagen über Umweltaspekte eines Produkts müssen auf wissenschaftlich nachprüfbaren Methoden basieren, die möglichst weitgehend akzeptiert und zugänglich sind.



INFORMATIONEN FÜR INTERESSIERTE KREISE

Grundsatz 4: Im Zusammenhang von Umweltkennzeichnungen müssen Informationen über die angewandten Verfahren, Methoden, Kriterien und Grundannahmen allen interessierten Kreisen zugänglich sein.



LEBENSWEG DES PRODUKTS BEACHTEN

Grundsatz 5: Bei der Entwicklung von Umweltaussagen und Umweltzeichen müssen alle Abschnitte des Produktlebensweges in Betracht gezogen werden. Eine Ökobilanz ist hilfreich, aber nicht erforderlich.



INNOVATIONSHEMMNISSE VERMEIDEN

Grundsatz 6: Umweltkennzeichnungen dürfen kein Hemmnis für Innovationen mit gleicher oder besserer Umweltleistung sein.



MAß HALTEN

Grundsatz 7: Verwaltungsaufwand und Informationsanforderungen bezüglich Umweltaussagen über Produkte müssen auf das erforderliche Maß beschränkt werden.



OFFENE BERATUNG

Grundsatz 8: Das Verfahren zur Entwicklung von Umweltkennzeichnungen muss offene Beratungen mit den interessierten Kreisen einschließen.



INFORMATIONEN FÜR KÄUFER

Grundsatz 9: Informationen, die für Umweltaussagen über ein Produkt relevant sind, müssen dem (potenziellen) Käufer eines Produkts zugänglich sein.

Abbildung 23: Neun Grundsätze der produktbezogenen Umweltkennzeichnung¹³⁰

¹³⁰ In Anlehnung an BMUB (2014), S. 18 f.

Insbesondere für die Beschaffung – die öffentliche sowie die unternehmensinterne – spielen produktbezogene Umweltinformationen eine wichtige Rolle. Sie sollten transparent und schnell erfassbar sein.

Welche weiteren Anforderungen und Hinweise bei der Beschaffung umweltfreundlicher Produkte zu beachten sind, kann über das Umweltbundesamt in Erfahrung gebracht werden. Schulungsmaterialien sollen eine umweltfreundliche Beschaffung in öffentlichen Institutionen weiter verankern (Tabelle 26).

Tabelle 26: Schulungsmaterial zur umweltfreundlichen Beschaffung¹³¹

Schulungsskript Nummer	Titel
1	Grundlagen der umweltfreundlichen Beschaffung
2	rechtliche Grundlagen der umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung
3	Einführung in die Verwendung von Produktkriterien aus Umweltzeichen
4	strategische Marktbeobachtung und Markt-Analyse
5	Einführung in die Berechnung von Lebenszykluskosten und deren Nutzung im Beschaffungsprozess
6	Hemmnis-Analyse für eine umweltfreundliche Beschaffung mittels Selbstevaluationstool

Diese Unterlagen zeigen Produktenwicklern von Unternehmen gleichzeitig, welche Anforderungen an umweltfreundliche Produkte durch öffentliche Einrichtungen gestellt werden.

¹³¹ Vgl. Umweltbundesamt (2017).

6 FAZIT

Die Kurzanalyse verdeutlicht, dass die Produktentwicklung einen sehr großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz eines Produkts nimmt. Nicht nur der Rohstoffverbrauch und die Umweltauswirkungen werden gesenkt, auch Kosten können maßgeblich eingespart werden. Die Mehrheit der resultierenden Fertigungs- und Materialkosten werden bereits während der Entwicklung des Produkts festgelegt. Ressourceneffizienz-Maßnahmen erschließen folglich ein hohes wirtschaftliches Potenzial und schaffen Wettbewerbsvorteile.

In der aktuellen Praxis sind Ressourceneffizienz-Strategien und -Maßnahmen jedoch oftmals nur ungenügend in den Produktentwicklungsprozess eingebunden. Gründe dafür sind u. a. fehlende Praxiserfahrung in der Umsetzung oder Schwierigkeiten bei der Auswahl und Priorisierung von Ressourceneffizienz-Strategien und -Maßnahmen¹³². Aus systematischer Sicht sollte jedoch bereits während der Produktentwicklung festgelegt werden, inwieweit ein Produkt fertigungs-, demontage-, reparatur-, material-, funktions- oder recyclinggerecht sein wird. So konnte beispielsweise ein Unternehmen durch eine reparatur-, demontage- und fertigungsgerechte Produktgestaltung als auch durch die Beachtung der Anforderungen des „Blauen Engels“ seinen Rohstoffaufwand um 90 % und seinen Energieaufwand um 50 % im Vergleich zu herkömmlichen Konkurrenzprodukten senken.¹³³

Das Ergebnis bzw. der umweltgerechte Produktentwurf sollte daher einer lebenswegbezogenen Analyse und Bewertung unterliegen. Auch die Nutzungs- und Entsorgungsphase werden hier in die überschlägigen Verbrauchsberechnungen einbezogen. So wird sichergestellt, dass aus den Ressourceneffizienz-Maßnahmen tatsächlich ein geringerer Material- und Energieaufwand entlang dem gesamten Lebensweg resultiert und unnötige Umweltbelastungen, Abfälle und erhöhte Ressourcenverbräuche vermieden werden.

¹³² Vgl. Pigozzo et al. (2013), S. 161.

¹³³ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017a).

Neben der lebenswegbezogenen Analyse und Bewertung stehen den Produktentwicklern weitere Methoden zur Verfügung, um Ressourceneffizienzpotenziale innerhalb der Grenzen des Produktentwicklungsprozesses zu ermitteln. Dazu zählt beispielsweise die Ressourcen-FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einfluss-Analyse)¹³⁴. Mit dieser Methode lassen sich Ressourcenknappheiten in den vorgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette identifizieren und Maßnahmen zur Verringerung des Versorgungsrisikos ableiten. Ein weiteres Beispiel ist die Baugruppen-Einfluss-Analyse, die die Bauteile mit den höchsten Ressourceneffizienzpotenzialen identifiziert, um diese in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase zu überarbeiten.

Werden in der Produktentwicklung Anforderungen aus Umweltkennzeichnungen beachtet und eingehalten, können Deklarationen am Produkt weitere Wettbewerbsvorteile generieren. Bekannte Umweltkennzeichen sind z. B. der „Blaue Engel“ oder „Siegelklarheit“. Insbesondere öffentliche Einrichtungen, aber auch andere Akteure sind angehalten, umweltgerecht zu beschaffen und sich an Umweltkennzeichnungen und Deklarationen zu orientieren.

Die Kurzanalyse zeigt, dass die Einbindung übergeordneter Ressourceneffizienz-Strategien und konkreter -Maßnahmen in den Produktentwicklungsprozess Effizienzpotenziale erschließt, die für Unternehmen Kosteneinsparungen in der Produktion und Wettbewerbsvorteile am Markt generieren.

¹³⁴ Vgl. VDMA (2016), S. 93.

LITERATURVERZEICHNIS

BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin, November 2016.

BMUB (2014): Umweltinformationen für Produkte und Dienstleistungen - Anforderungen - Instrumente - Beispiele [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/umweltinfos_produkte_dilei_broschuere_bf.pdf

Braungart, M. (2017): Die Cradle to Cradle®-Zertifizierung [online]. Büro Braungart [abgerufen am: 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.braungart.com/de/content/kontaktimpresum>

Buchert, T., Halstenberg, F., Bonvoisin, J., Lindow, K. und Stark, R. (2017): Target-driven selection and scheduling of methods for sustainable product development. Journal of Cleaner Production, Vol. 161 (2017), Elsevier, S. 403-421.

Bundespreis-Ecodesign (2016): Mehr als schön - Die Preisträger und Nominierten des Bundespreises Ecodesign 2016 [online]. Internationales Design Zentrum Berlin, [abgerufen am 14. Juli 2017] verfügbar unter: <https://www.bundespreis-ecodesign.de/downloads/3309/BroschreWander-ausstellungBundespreisEcodesign2016.pdf>

DIN EN ISO 14040:2009-11: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

eco3e (2017): Indicators [online]. Institute ENSAM of Chambéry, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://eco3e.eu/en/base/indicators/>

ECODESIGN KIT (2017): Ecodesign Kit [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) & Umweltbundesamt, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <https://www.ecodesign-kit.de/home-willkommen/>

ECODESIGN Pilot (2017a): Erhöhung der Demontagefreundlichkeit [online]. TU Wien, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/717.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017b): Verbesserung der Wartbarkeit [online]. TU Wien, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/715.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017c): Zielgerichtete Materialwahl [online]. TU Wien, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/701.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017d): Optimierung der Funktionsweise des Produkts [online]. TU Wien, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/710.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017e): Verbrauchsreduktion in der Nutzung [online]. TU Wien, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/713.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017f): Wiederverwendung von Produktteilen [online]. TU Wien, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/DEUTSCH/PDS/DETAILS/718.HTM>

ECODESIGN Pilot (2017g): ECODESIGN Pilot [online]. TU Wien [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.ecodesign.at/forschungsprojekte/ecodesign_pilot/DE/

ECODESIGN Tool (2017): Ecodesign Tool [online]. Koslowski & Dwalschwili GbR, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <https://www.ecodesigntool.com/>

Ehrlenspiel, K. (2007): Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, ISBN 978-3-446-40733-6.

Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, ISBN 978-3-446-43548-3.

Eigner, M.; Roubanov, D. und Zafirov, R. (2014): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-662-43815-2.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C. und Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion [online]. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 01/2012, [abgerufen am: 14. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4237.html>, auch verfügbar als PDF unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>.

Goedkoop, M. J.; van Halen, C. J. G.; te Riele, H. R. M. und Rommens, P. J. M. (1999): Product Service systems, Ecological and Economic Basics. The Netherlands Ministry of Spatial Planning, Housing and the Environment, Den Hag, auch verfügbar als PDF unter: <http://teclim.ufba.br/jsf/indicadores/holan%20Product%20Service%20Systems%20main%20report.pdf>

Gräble, M.; Thomas, O.; Fellmann, M. und Krumeich, J. (2010): Vorgehensmodelle des Product-Service Systems Engineering. Überblick, Klassifikation und Vergleich. In: Böhmann, T. und Leimeister, J. M.: Proceedings der Teilkonferenz Integration von Produkt & Dienstleistung – Hybride Wertschöpfung, im Rahmen der Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, 23. - 25.02.2010, Göttingen, Books on Demand, Norderstedt, S. 31-42.

Hahn, D. und Kaufmann, L. (2002): Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement: Internationale Konzepte – Innovative Instrumente – Aktuelle Praxisbeispiele. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Jepsen, D.; Volz, S.; Reihlen, A.; Wirth, O.; Vollmer, A. und Spengler, L. (2014): Themenbereich B. Grundlagen und Prinzipien des Ökodesign. Themenblock 2: Umweltbezogenes Prozesswissen. Produkt- oder Prozesseigenschaft [online]. Ökopol Institut für Ökologie und Politik, Hamburg, [Abgerufen am: 14. Juli 2017], verfügbar unter: http://ipp-netzwerk.hamburg.de/netzwerk/upload/public/media/1424815766_B2_1_Produkt_Prozesseigenschaft.pdf

Kaeser Kompressoren Se (2017): Betreibermodelle [online]. Kaeser Kompressoren Se, [abgerufen am: 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.kaeser.de/loesungen/betreibermodelle/>

Kaiser, O., Krauss, O., Seitz, H. und Kirmes, S. (2016): Ressourceneffizienz im Leichtbau [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/Kurzanalyse_17_Ressourceneffizienz_im_Leichtbau.pdf

Kalweit, A.; Paul, C.; Peters, S.; Wallbaum, R. (2012): Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung – Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-02641-6.

Krishnan, V. und Ulrich, K. T. (2001): Product Development Decisions: A Review of the Literature. Management Science, Jan. 2001, 47 (1), S. 1 – 21.

Leismann, K.; Schmitt, M.; Rohn, H. und Baedeker, C. (2012): Nutzen statt Besitzen. Auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Konsumkultur. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, Schriften zur Ökologie, Band 27, auch verfügbar als PDF unter: https://www.boell.de/sites/default/files/Endf_Nutzen-StattBesitzen_web.pdf

Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2000): Eco-indicator 99 – Manual for Designers – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment [online]. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf

Niebaum, A., Seitz, H. und Kaiser, O. (2017): Ressourceneffizienz durch Bionik [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, [abgerufen am 17. Okt. 2017], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_Nr._19_Ressourceneffizienz_durch_Bionik_bf.pdf

Oberender, C. (2006): Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 385, VDI Verlag 2006, Berlin.

Ökopol (2012): B1 Ökodesign-Prinzipien [online]. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg, [abgerufen am: 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://ipp-netzwerk.hamburg.de/netzwerk/index.php?topic=86>

Österreicher, C. (k. A.): Fallbeispiel: „Die Produktlinienanalyse am Beispielprodukt ‚Handy‘“ [online]. beratung.supervision & coaching, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.umweltbildung.at/cms/praxisdb/dateien/403_pdf.pdf

Pahl, G.; Beitz, W., Grote, K.-H. und Feldhusen, J. (2013): Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-29568-3.

Pigosso, D., Rozenfeld, H. und McAloone, T. (2013): Ecodesign maturity model: a management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 59, Elsevier, S. 160 - 173.

Pigosso, D. und McAloone, T. (2017): Ecodesign Maturity Model (EcoM2) [online]. Technical University of Denmark, [abgerufen am 4. August 2017], verfügbar unter: <http://www.ecodesign.dtu.dk/EcoM2>

Reinhäckel und Schilling (2007): Virtuelle Prototypen - Möglichkeiten und Grenzen [online]. *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, Vol. 4(2007), [abgerufen am: 14. Juli 2017], verfügbar unter: <https://www.rtejournal.de/ausgabe4/1160>

Rolls-Royce (2012): Rolls-Royce celebrates 50th anniversary of Power-by-the-Hour [online]. Rolls-Royce, 30. Okt. 2012, [abgerufen am: 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.rolls-royce.com/media/press-releases/yr-2012/121030-the-hour.aspx>

Saulich, K. (2016): Ressourceneffizienz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2016-Kurzanalyse-VDI-ZRE-15_Biobasierte-Rohstoffe_Webversion_mit_Links_01.pdf

Schaltegger, S.; Herzig, C.; Klieber, O.; Klinke, T. und Müller J. (2007): Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen [online], Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Econsense - Forum Nachhaltige Entwicklung der Deutschen Wirtschaft e.V., Centre für Sustainability Management, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://econsense.de/sites/all/files/nachhaltigkeitsmanagement_unternehmen.pdf

Schebek, L. et al. (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf

The Waste and Resources Action Programme (2017): What is industrial symbiosis? [online]. The Waste and Resources Action Programme, [abgerufen am 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.wrap.org.uk/content/what-industrial-symbiosis>

Theden P. und Colsmann, H. (2013): Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) nach QS-9000 [online]. QZ-online.de – Portal für Qualitätsmanagement, [abgerufen am: 17. Juli 2017], verfügbar unter: <https://www.qz-online.de/qualitaets-management/qm-basics/methoden/fmea/artikel/fehlermoeglichkeits-und-einflussanalyse-fmea-nach-qs-9000-270675.html>

Tukker, A. (2004): Eight types of Product-Service System: Eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. Business Strategy and the Environment, 13 (4), S. 246 – 260.

Umweltbundesamt (2015): Elemente einer erfolgreichen Ressourcenschonungspolitik – Position Oktober 2015 [online]. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, [abgerufen am 14. Juli 2017], verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba-positionspapier_elemente_einer_erfolgreichen_ressourcenschonungspolitik_2015_web_0.pdf

Umweltbundesamt (2017): Umweltfreundliche Beschaffung: Schulungsskript 1 – Grundlagen der umweltfreundlichen Beschaffung [online]. Umweltbundesamt, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltfreundliche-beschaffung-schulungsskript-1>

VDI 2206:2004-06: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2221:1993-05: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4600:2012-01: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2:2016-03 (Entwurf): Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4801:2016-02 (Entwurf): Ressourceneffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Strategien und Vorgehensweisen zum effizienten Einsatz natürlicher Ressourcen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017a): Materialeffiziente Produktion von LED-Lampen [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, [abgerufen am: 7. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.ressource-deutschland.tv/themen/allgemeines/materialeffiziente-produktion-von-led-lampen/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b): Kunststoff: Weniger Material, mehr Qualität [online]. VDI ZRE GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.ressource-deutschland.tv/themen/kunststoffverarbeitung/kunststoff-weniger-material-mehr-qualitaet/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017c): Edelstahlguss ganz ohne Feuer [online]. VDI ZRE GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.ressource-deutschland.tv/themen/metallverarbeitung/edelstahlguss-ganz-ohne-feuer/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017d): Feines Gießen statt grober Hobel [online]. VDI ZRE GmbH, [abgerufen am 17. Juli 2017], verfügbar unter: <http://www.ressource-deutschland.tv/themen/metallverarbeitung/feines-giessen-statt-grober-hobel/>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017e): Wettbewerbsvorteil Ressourceneffizienz. Definitionen, Grundlagen, Fakten und Beispiele. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/bilder/publikationen/VDIZRE_faktencheck_2016_web.pdf

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Entwurf (2017): Bewertung des Ressourcenaufwands - Energiespeichertechnologien. Geplante Veröffentlichung der Studie im Januar 2018. Die Studie ist ab diesem Zeitpunkt unter folgender Internetadresse abzurufen: <http://www.ressource-deutschland.de/publikationen/studien/>

VDMA (2016): Ressourcen-Sparbuch: In drei Schritten zu effizienteren Maschinen und Anlagen. VDMA Verlag, Frankfurt am Main.

Weise, J. (2007): Planung und Steuerung von Innovationsprojekten. Dissertation. Technische Universität Berlin, Deutscher Universitäts-Verlag, Berlin.

ANHANG

Tabelle 27: Zielstellungen der Design-for-X-Strategien, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Ökodesign-Prinzip direkt bedingen

Design-for-X-Strategien und Ressourceneffizienz-Maßnahmen	Langlebigkeit	Reparierbarkeit	Materialeffizienz	Energieeffizienz	Problemstoffarmut	Einsatz nachwachsender Rohstoffe	Kreislaufführbarkeit
Fertigungsgerechte Produktgestaltung¹³⁵							
Integrierte Bauweise	-	-	-	-	-	-	-
Reduktion des Bearbeitungsvolumens, z. B. endabmessungsnahes Umformen	-	-	-	-	-	-	-
Reduktion der Fertigungsschritte	-	-	-	-	-	-	-
Intelligenter Zukauf von Bauteilen	-	-	-	-	-	-	-
Vereinheitlichung des Fertigungsverfahrens durch standardisierte Baureihen, Einsatz von einheitlichem Werkzeug und Erhöhung der Losgrößen	-	-	-	-	-	-	-
Demontagegerechte Produktgestaltung¹³⁶							
Zugänglichkeit zu Verbindungselementen gewährleisten und die Demontageverbindungen leicht auffindbar anbringen	X	X	-	-	-	-	X
Umkehrbarkeit der Montagevorgänge sicherstellen	X	X	-	-	-	-	X
Demontagegerechte Baustruktur mit einheitlichen Demontage- und Fügerichtungen anstreben	X	X	-	-	-	-	X
Einfach lösbare Verbindungen verwenden	X	X	-	-	-	-	X
Funktionsfähigkeit der lösbaren Verbindungen über die gesamte Lebensdauer sicherstellen	X	X	-	-	-	-	X

¹³⁵ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600 f.¹³⁶ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017b).

Design-for-X-Strategien und Ressourceneffizienz-Maßnahmen	Langlebigkeit	Reparierbarkeit	Materialeffizienz	Energieeffizienz	Problemstoffarmut	Einsatz nachwachsender Rohstoffe	Kreislauffähbarkeit
---	---------------	-----------------	-------------------	------------------	-------------------	----------------------------------	---------------------

Reparaturgerechte Produktgestaltung^{137, 138}

Feinmotorische Arbeiten verringern, Greif- und Bewegungsräume benutzerfreundlich gestalten und etablierte bzw. standardisierte Montiertechniken verwenden	X	X	-	-	-	-	X
Leichte Reinigung ermöglichen und gering verwinkelte Konstruktion beachten	X	X	-	-	-	-	X
Unumgänglicher Verschleiß auf austauschbare Bauteile lenken	X	X	-	-	-	-	X
Einsatz einfacher Verschleißerkennung	X	X	-	-	-	-	X
Notwendige Serviceintervalle des Produkts anzeigen	X	X	-	-	-	-	X
Vermeidung von benötigten Spezialwerkzeugen	X	X	-	-	-	-	X

Werkstoff-/materialgerechte Produktgestaltung^{139, 140}

Optimieren von Bauteilgröße und -auslegung	-	-	X	-	-	-	-
Einsatz von Werkstoffen mit guter Umweltbilanz	X	-	X	X	X	X	X
Toxische Werkstoffe/ Bestandteile vermeiden	-	-	-	-	X	-	X
Einsatz von Werkstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen	-	-	-	-	-	X	-
Anwendung von Verschleißschutz, Korrosionsschutz und Hartstoffschichten	X	-	-	-	-	-	-
Vermeiden des Einsatzes untrennbarer Werkstoffverbunde, Einsatz von Bauteilen/Baugruppen aus jeweils einem Material (Einstoffteile)	-	-	-	-	-	-	X
Rohstoffe und Bauteile mit bekannt problematischer Herkunft vermeiden	-	-	X	-	-	-	-

¹³⁷ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600.

¹³⁸ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017a).

¹³⁹ Vgl. Kalweit et al. (2012), S. 600.

¹⁴⁰ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017c).

Design-for-X-Strategien und Ressourceneffizienz-Maßnahmen	Langlebigkeit	Reparierbarkeit	Materialeffizienz	Energieeffizienz	Problemstoffarmut	Einsatz nachwachsender Rohstoffe	Kreislauffähigkeit
Funktionsgerechte Produktgestaltung¹⁴¹							
Sicherstellen hoher Produktzuverlässigkeit	X	-	-	-	-	-	-
Hohe Funktionsgüte sicherstellen und Einfluss von Störungen herabsetzen	X	-	-	-	-	-	-
Aufrüstbarkeit des Produkts vorsehen, Technologiesprünge ermöglichen	X	-	-	-	-	-	-
Produkt für multifunktionale Nutzung als unterschiedliche Funktionen vorsehen	-	-	X	-	-	-	-
Nachstell- und Justierbarkeit vorsehen zum Ausgleich von auftretendem Verschleiß	X	-	-	-	-	-	-
Einfaches Funktionsprinzip bzw. einfache Baustruktur verwirklichen	X	X	-	-	-	-	X
Robuste Ausführung anstreben	X	-	-	-	-	-	-
Nutzungsgerechte Produktgestaltung¹⁴²							
Umweltschädliche Fehlnutzung möglichst vermeiden	-	-	-	X	-	-	-
Aktuellen Verbrauch des Produkts in der Nutzungsphase anzeigen	-	-	-	X	-	-	-
Energiebedarf in der Nutzungsphase durch Erhöhung des Wirkungsgrads und Wahl eines geeigneteren Funktionsprinzips verbessern	-	-	-	X	-	-	-
Einsatz erneuerbarer Energieträger in der Nutzungsphase ermöglichen	-	-	-	X	-	X	-
Möglichst geringen Verbrauch an bzw. Einsatz von umweltverträglichen oder erneuerbaren Rohstoffen für Produktnutzung ermöglichen	-	-	X	-	-	X	-
Abfälle aus der Nutzungsphase vermeiden bzw. kreislauffähig gestalten	-	-	-	-	-	-	X
Lebensdauer der einzelnen Komponenten aufeinander abstimmen und zeitloses Design wählen	X	-	-	-	-	-	-
Oberflächen gebrauchstauglich gestalten	-	-	X	-	-	-	-

¹⁴¹ ECODSIGN Pilot (2017d).¹⁴² ECODSIGN Pilot (2017e).

Design-for-X-Strategien und Ressourceneffizienz-Maßnahmen	Langlebigkeit	Reparierbarkeit	Materialeffizienz	Energieeffizienz	Problemstoffarmut	Einsatz nachwachsender Rohstoffe	Kreislauffähigkeit
---	---------------	-----------------	-------------------	------------------	-------------------	----------------------------------	--------------------

Recyclinggerechte und entsorgungsgerechte Produktgestaltung¹⁴³

Vereinfachte Schadstoffentfrachtung ermöglichen	-	-	-	-	-	-	X
Materialtrennung zu Verwertungszwecken ermöglichen	-	-	X	-	-	-	X
Leichte Demontage ermöglichen	X	X	-	-	-	-	X
Verträglichkeit der Materialien zur Wiederverwertung sicherstellen	-	-	X	-	-	-	X
Oberflächenbeschichtung mit Grundwerkstoff recyclingverträglich wählen	-	-	X	-	-	-	X
Entnahme von Betriebsstoffen und unvermeidbaren Problemstoffen ermöglichen	-	-	X	-	-	-	X
Entsorgungsmöglichkeit beim Endverbraucher berücksichtigen und Anleitung zur Entsorgung am Produkt angeben	-	-	-	-	-	-	X
Normgerechte Kennzeichnung aller Materialien vornehmen	-	-	-	-	-	-	X
Möglichst die Wiederverwendung ganzer Baugruppen prüfen (Remanufacturing)	-	-	X	-	-	-	X

¹⁴³ Vgl. ECODESIGN Pilot (2017f).

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
Fax +49 30-2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE