

VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit



# STRATEGIEN UND MAßNAHMEN

Steigerung der Ressourceneffizienz  
im Unternehmen

Kreislaufgerechte  
Produktgestaltung

<https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/strategien-und-massnahmen/produktbezogen/kreislaufgerechte-produktgestaltung/>

## 1 RESSOURCENEFFIZIENZ, ANWENDUNGSBEREICH, GRENZEN

### Ziel und Funktion

Eine kreislaufgerechte Produktgestaltung fokussiert die Sicherstellung der Wiedernutzbarkeit und Kreislaufführung von im Produkt verwendeten Bauteilen und Materialien. Hierbei spielen insbesondere die Separierbarkeit von Materialien und Komponenten, die Materialauswahl sowie eine angemessene Kennzeichnung des Produktaufbaus und der stofflichen Zusammensetzung eine Rolle.

### Bezug zur Ressourceneffizienz

Werden Stoffe und Komponenten aus einem Produkt extrahiert und wieder für die Verwendung in einem neuen Produkt aufbereitet, sind erneute Ressourcenaufwände für die Extraktion und initiale Herstellung des Materials und der Bauteile vermeidbar. Zusätzlich erfolgt eine Reduktion von Abfällen, die ansonsten auf Deponien gelagert werden müssten.

### Anwendungsbereiche und Akteure

Die wesentliche Grundvoraussetzung für kreislauffähige Produkte wird bereits in der Produktentwicklung gelegt. Hier wird entschieden, welche Materialien eingesetzt werden und wie diese im Produkt zu verbauen sind. Außerdem wird durch die Produktgestaltung indirekt entschieden, welche der folgenden Strategien zur zirkulären Nachnutzung obsoleter Bauteile für das Produkt Anwendung finden kann (nach VDI 2243 [1]):

Die Wiederverwendung beschreibt die erneute Nutzung eines Produktes oder einer Produktkomponente für denselben Zweck. Hierfür erfolgt zu meist eine Wiederaufarbeitung (Remanufacturing). Diese Vorgehensweise ist insbesondere sinnvoll für wertvolle bzw. nur aufwändig herstellbare Produkte oder Bauteile. Aus diesem Grund ist eine Wiederverwendung als Strategie insbesondere für langlebige Konsum- oder Investitionsgüter relevant (z. B. Turbinenschaufel).

Weiterverwendung bezeichnet die Nutzung eines Produktes nach seinem Lebensende für einen anderen als den ursprünglich erdachten Zweck (z. B. Nutzung von Altreifen als Kollisionsschutz bei Schiffen). Die hier gängigen

Nutzungskaskaden sind für Produktentwickler allerdings schwieriger vorherzusehen und daher zumeist nur in Einzelfällen umsetzbar.

Wiederverwertung bezieht sich auf das Recycling von Bauteilen, um aus den rückgewonnenen Materialfraktionen erneut Bauteile mit demselben Zweck des Ausgangsproduktes herstellen zu können. Daher kommt diese Strategie insbesondere für Materialien infrage, die nach einem Recycling in derselben Qualität wie das Ausgangsmaterial bereitgestellt werden können (z. B. Kunststoffgranulat).

Weiterverwertung ist die Nutzung recycelter Materialien für einen anderen als den ursprünglichen Zweck. Dabei bedeutet Downcycling, dass die aufgearbeiteten Stoffe in einem niederwertigen Produkt eingesetzt werden (z. B. Nutzung von Rotorblättern zur Zementherstellung). Dies ist insbesondere sinnvoll, wenn die Materialqualität nach einem Recycling nicht mehr für den ursprünglichen Zweck ausreicht. Upcycling beschreibt den entgegengesetzten Fall: Die aufgearbeiteten Stoffe werden in einem höherwertigen Produkt eingesetzt (z. B. Herstellung einer Uhr aus alten Cola-Dosen).

### Grenzen

Durch die stoffliche Verwertung von Materialien ergeben sich Verluste, so dass eine komplette Wiedergewinnung des Wertstroms nicht möglich ist. Darüber hinaus wird durch die Aufarbeitung selbst ein Energie- und Materialaufwand verursacht (z. B. durch das Einschmelzen von Metallen oder die notwendige Logistik).

Eine Wieder- und Weiterverwendung sollten daher gegenüber stofflicher Verwertung stets vorrangig eingesetzt werden [2]. Hierfür sind jedoch gewisse Randbedingungen erforderlich, die nicht immer erfüllbar sind, z. B. eine hohe Qualität von Remanufacturing-Produkten bei geringen Aufarbeitungskosten. Darüber hinaus bedarf eine Wiederaufarbeitung einer fundamentalen Veränderung der wertschöpfenden Struktur eines Unternehmens, welche unter anderem Rückholssysteme, Aufbereitungszentren und Know-how bzgl. Remanufacturing erfordert.

## Einordnung der Strategie/Maßnahme

<b>Bezug</b>	Produkt
<b>Einflussnehmender Akteur</b>	Produktentwicklung
<b>Lebensphasen mit relevanten Auswirkungen</b>	Rohmaterialherstellung, Verwertung/Beseitigung
<b>Lebensweganalyse</b>	erforderlich

## 2 WEGE DER UMSETZUNG

### 2.1 Separierbarkeit von Bauteilen und Materialien

Grundvoraussetzung für eine erneute Nutzung von Produkten bzw. von Materialien ist eine möglichst gute Trennbarkeit von Komponenten und Materialfraktionen. Wo in diesem Kontext die Prioritäten liegen, hängt von der verfolgten Strategie für das Lebensende und der damit verbundenen Prozessabfolge ab. Eine demontagegerechte Produktgestaltung ist sowohl für die Wiederverwendung als auch für die stoffliche Verwertung, insbesondere zur Schadstoffentfrachtung, wichtig. Beide Verfahren profitieren hier von einer guten Zugänglichkeit der Komponenten und dem Einsatz weniger unterschiedlicher Werkzeuge. Darüber hinaus sollten die Dauer und Anzahl der Schritte einer Demontage minimal ausfallen. Dies kann insbesondere durch den Einsatz weniger Verbindungselemente und einen Verzicht auf Klebeverbindungen realisiert werden. Darüber hinaus sollten sowohl die Demontageabfolge als auch Komponenten mit gefährlichen Stoffen klar gekennzeichnet vorliegen [3, S. 75 ff.].

Für die Wiederverwendung und die stoffliche Verwertung existieren jedoch auch Unterschiede. Insbesondere differenziert sich hier eine optimale Gestaltung der Baustruktur. Im Sinne des Recyclings sollten Bauteile in Demontagebaugruppen gegliedert sein, welche entweder aus homogenen Werkstoffen oder aus Stoffen, die auf ähnliche Arten verwertbar sind, bestehen. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, wenn Komponenten mit hohem Materialwert einfach zugänglich und schnell separierbar sind. Für eine Wiederverwendung hingegen bietet sich zumeist eine Gliederung in funk-

tionale Module an, die anhand unterschiedlicher Innovationszyklen austauschbar sind. Außerdem ergeben sich Unterschiede im Aufbau. Für das Recycling sollten Verbindungen schnell zerstörbar sein, um die Zeit für die Entfrachtung zu verkürzen. Hier eignen sich auch Sollbruchstellen, um den Aufwand zusätzlich zu verringern. Für eine Wiedernutzung ist eine zerstörungsfreie Lösbarkeit der Verbindungen wichtig [1, S. 15].

Ob eine Demontage der Produkte im Falle des Recyclings überhaupt durchgeführt wird, hängt auch davon ab, wo der Recyclingprozess stattfindet. So werden in Deutschland beispielsweise Elektrokleingeräte von Verwertern zumeist geschreddert und automatisch sortiert, um die einzelnen Fraktionen zu extrahieren. In diesem Fall müssen zumindest aus Sicht des Recyclings wenige Randbedingungen für eine demontagerechte Produktgestaltung beachtet werden (z. B. die Extrahierbarkeit von Gefahrgütern wie Akkus). Im Gegensatz hierzu ändert sich die Situation, wenn das Recycling und die Wiederaufarbeitung einzelner Produktmodule direkt beim Hersteller durchgeführt werden. Apple verwendet z. B. Demontageroboter, die bis zu 200 Telefone pro Stunde zerlegen können [4].

### **Demontagerechte Konstruktion eines Mobiltelefons**

Das Unternehmen Fairphone forciert unter Ressourcengesichtspunkten die Demontage ihrer Telefone und eine anschließend gezielte Verwertung der einzelnen Module. Ausgediente Telefone können zu diesem Zweck an den Hersteller zurückgeschickt werden [5]. Das Fairphone 2 kann darüber hinaus als Referenzbeispiel für eine besonders gelungene demontagerechte Produktgestaltung zum Zweck des Recyclings betrachtet werden. So kann das Telefon bis zur Hauptplatine ohne ein einziges Werkzeug auseinanderggebaut werden. Zudem ist das Telefon modular gestaltet, so dass einige Komponenten ausgetauscht (z. B. Batterie) und ggf. wiederverwendet werden können (z. B. Kamera). Knöpfe, Kabel und Schrauben sind leicht zugänglich und auf Klebeverbindungen wird weitestgehend verzichtet. Weiterhin sind im Inneren des Gerätes Piktogramme und Hinweise zur Demontage dargestellt. Zusätzlich existiert eine separate Anleitung zum Aufbau des Telefons [6].

## 2.2 Recyclingfähige Materialien

Neben der einfachen Separierbarkeit der Stofftypen spielt auch die prinzipielle Eignung der Materialien für eine Wiederverwertung eine große Rolle. Im Bereich technischer Produkte sind hier insbesondere die "Massemetalle" Kupfer, Blei, Aluminium und Stahl geeignet, da hier bereits ein Anteil wiederverwerteter (sekundärer) Rohstoffe an neuen Raffinade- und Rohstahlerzeugnissen zwischen 50 % und 70 % erreicht werden kann [7, S. 14]. Darüber hinaus lassen sich hier durch Wiederverwertung teilweise signifikante Ressourceneinsparungen erzielen. So wird beispielsweise für die Aufbereitung von Sekundäraluminium nur ca. 6 % des Energieaufwandes für die Herstellung von Primäraluminium benötigt [8, S. 3].

Schwieriger ist die Situation im Fall von Kunststoffen. Für private Haushalte und Gewerbe als Endverbraucher werden derzeit nur rund ein Drittel aller anfallenden Kunststoffabfälle recycelt. Der Großteil wird hier noch immer thermisch verwertet [7, S. 12]. Ein Hemmnis für die Erreichung einer höheren Recyclingquote liegt vor allem in der zunehmenden Komplexität der Materialzusammensetzungen. Neben Weichmachern, Beschichtungen oder Mischungen verschiedener Kunststoffe werden teilweise auch Carbon- oder Glasfasern beigemischt, die ein Recycling nahezu unmöglich machen. Weiterhin spielt die Farbe der Kunststoffe eine wichtige Rolle, da dunkel gefärbte Kunststoffe nicht für neue helle Kunststoffprodukte verwendbar sind [9].

Ebenso problematisch ist der zunehmend kleinteilige Einsatz von wertvollen und seltenen Materialien wie Gold, Silber, Palladium oder Neodym. Insbesondere in elektronischen Produkten sind viele dieser teilweise seltenen Stoffe oft in geringer Konzentration enthalten. Die Extraktion dieser Materialien ist dabei häufig aufwändig und daher für die Rückgewinnung geringer Materialmengen ökonomisch nicht lohnenswert. Dieses Problem gewinnt im Zuge der digitalen Transformation an Relevanz, da die hierfür notwendigen Sensoren ebenfalls wertvolle Stoffe enthalten, die nur schwer zurückgewonnen werden können (z. B. Silber in RFID Chips) [10].

### **Recycling von Rotorblättern**

Ein bisher ungeklärtes Problem im Kontext der Windenergie betrifft die angemessene Verwertung der Rotorblätter von Windkraftanlagen. Probleme bestehen hier einerseits in der Demontage und im Transport der sperrigen Bauteile. Wesentlichstes Problem ist jedoch die schwierige Recyclbarkeit der Verbundstoffe, aus denen die Blätter hergestellt sind. Aus diesem Grund erfolgt bisher fast ausschließlich eine thermische Verwertung. Im ungünstigsten Fall kann es hier jedoch zu einer Beschädigung der Luftfilter der Verbrennungsanlagen kommen. Als aussichtsreichste Handlungsoptionen bestehen derzeit die Wiederaufarbeitung der Blätter sowie ein Downcycling der Stoffe als Input für die Zementproduktion [11].

## **2.3 Transparente Produktdokumentation**

Wenn die Wiederaufarbeitung oder das Recycling von Komponenten außerhalb des Unternehmens durchgeführt wird, ist es seitens des Herstellers wichtig, alle hierfür benötigten Informationen bereitzustellen. In diesem Kontext wird zum einen eine Aufbauanleitung des Produktes benötigt, um die spätere Demontage zu vereinfachen. Darüber hinaus sollte eine vollständige Kennzeichnung aller im Produkt verwendeten Stoffe vorliegen. Hierfür können z. B. auch Label direkt an das Produkt angebracht werden, die vom Recycler ausgelesen werden können (z. B. QR-Codes oder RFID-Chips).

### **Innovatives Konzept für zirkuläre Stoffströme**

Das Berliner Start-up "Circular Fashion" hat ein innovatives Konzept entwickelt, welches dabei helfen soll, zirkuläre Stoffströme in der Modebranche zu etablieren. Die Grundidee ist dabei ein Plattform-Ansatz, der es erlauben soll, Hersteller, Nutzer von Kleidung sowie Recyclingunternehmen besser zu vernetzen. Mit der Plattform bekommen Modedesigner Hilfestellungen, wie die Nachhaltigkeit ihrer Entwürfe verbessert werden kann und welche Materialien hier vorteilhaft sind. Jedes Kleidungsstück ist zusätzlich mit einer "Circular Fashion ID" versehen, die Informationen über die in der Kleidung verwendeten Stoffe und den

Prozess der Herstellung bereithält. Diese Daten können einerseits vom Nutzer, aber auch von Recyclingunternehmen eingesehen werden. Die Verwertungsunternehmen können die individuelle Stoffzusammensetzung verwenden, um den Sortierprozess der Stoffe zu vereinfachen [12].

### 3 METHODEN

#### 3.1 Gestaltungsprinzipien für recyclinggerechtes Produktdesign

In der einschlägigen Fachliteratur wurden bereits zahlreiche Gestaltungsprinzipien zur recyclingfreundlichen Produktgestaltung veröffentlicht. Diese können als erste Orientierung für eine Überarbeitung von Produktentwürfen verwendet werden [1, S. 15]. Hierbei stehen vor allem Hilfestellungen für die Minimierung der Materialvielfalt und eine Erhöhung der Demontagefähigkeit im Vordergrund.

#### 3.2 Abstimmung zwischen Wiederaufarbeitung/Recycling und Produktentwicklung

Erfolgt die Aufarbeitung bzw. das Recycling von Produkten im eigenen Unternehmen sollten Probleme, die hierbei entstehen (z. B. schwierige Demontierbarkeit), regelmäßig an die Produktentwicklung kommuniziert werden, um dauerhafte Verbesserungen herbeizuführen.

#### 3.3 Modulare Produktstrukturen

Modulare Produktstrukturen können dabei helfen, Produkte leichter in einzelne Baugruppen und/oder Materialfraktionen zu zerlegen. Für ein Recycling muss das Produkt entsprechend homogenen Materialgruppen bzw. gleichen Recyclingwegen strukturiert sein. Für eine Wiederverwendung hingegen stehen andere Anforderungen an die Baustruktur im Vordergrund (z. B. funktionale Modularisierung). Zu den bekanntesten Modularisierungsmethoden gehören die Vorgehensweisen von Pimpler, T. U. und Eppinger, S. D. [13], Dahmus, J. B. et al. [14] sowie Krause, D. und Gebhard, N. [15].



### 3.4 Materialdatenbanken

Für eine analytische Materialauswahl unter Gesichtspunkten der Funktionalität und Ressourceneffizienz müssen zahlreiche Parameter gleichzeitig betrachtet und gegeneinander abgewogen werden. Hierbei sind neben den klassischen Faktoren der beanspruchungsgerechten Werkstoffauswahl (Härte, Festigkeit, Gewicht, Viskosität etc.) weitere Aspekte zu berücksichtigen wie Energieaufwand Herstellung und Recyclingfähigkeit. Gerade für letztere Faktoren ist jedoch eine angemessene Datenlage erforderlich. Hierfür wurden kommerzielle Materialdatenbanken (z. B. GRANTA CES Selector) entwickelt, welche entsprechende Werte beinhalten. Der Zugang und die Nutzung dieser Datenbanken sind in der Regel sehr einfach gestaltet und verlangen wenige Vorkenntnisse.

### 3.5 Bestimmung der Material-Kreislaufeignung

Um zu entscheiden, ob es ökonomisch lohnenswert ist, ein Material im Kreislauf zu führen, wird in der VDI Richtlinie 2243 eine einfache Formel zur Berechnung vorgestellt. Hierfür werden die Kosten der Neuproduktion eines Materials zu den Recyclingkosten ins Verhältnis gesetzt. Konkret werden im Zähler die Kosten des Neuteils und die Beseitigungskosten des Altteils addiert. Im Nenner finden sich die Recyclingkosten für das Altteil, die sich aus den Kosten für Demontage, Aufarbeitung und Logistik zusammensetzen. Ein Beispiel zur Berechnung der Material-Kreislaufeignung findet sich in der Richtlinie [1].

### 3.6 Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) definiert die „Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe - außer Wasser und Luft - ausgedrückt in Gewichtseinheiten“ [16], z. B. Tonne verbrauchte Rohstoffe pro Tonne Produkt. Der KRA beinhaltet also die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung erforderlichen Rohstoffe und Energierohstoffe. Diese lassen sich in metallische, biotische, energetische Rohstoffe sowie Bau- und Industriemineralien einteilen. Die für eine Bewertung erforderliche Datenbasis bezieht sich dabei auf eine funktionelle Einheit [17]. Die funktionale Einheit gibt an, auf welcher Basis verschiedene Prozesse, Technologien o. Ä. miteinander verglichen werden können.

Für den Vergleich der Effizienz von zwei Verkehrsmitteln beispielsweise könnte der notwendige Rohstoffaufwand bestimmt werden, um 100 km Strecke zu überwinden. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit ermöglicht bzw. der Nutzen des Systems definiert.

Die Anwendung der Methode ist grundsätzlich komplex und erfordert eine fundierte Datenbasis, die in Datenbanken wie der freizugänglichen Datenbank ProBas des Umweltbundesamtes [18] oder der lizenzierungspflichtigen Datenbankecoinvent zur Verfügung gestellt wird.

### 3.7 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) bezeichnet „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung entsteht“ [19]. Der KEA setzt sich also aus der benötigten Energie zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts bzw. einer Dienstleistung zusammen [19]. Neben einem guten Verständnis der Systemgrenzen erfordert die Berechnung des KEA eine umfangreiche Datenbasis, die auf eine funktionelle Einheit zu beziehen ist. Die funktionale Einheit gibt an, auf welcher Basis verschiedene Prozesse, Technologien o. Ä. miteinander verglichen werden können. Für den Vergleich der Effizienz von zwei Verkehrsmitteln beispielsweise könnte der notwendige Energieaufwand bestimmt werden, um 100 km Strecke zu überwinden. Im Ergebnis wird der Energieverbrauch festgelegt, der z. B. in Megajoule je gewählter Bezugsgröße angegeben wird.

Die Anwendung der Methode ist grundsätzlich komplex und erfordert eine fundierte Datenbasis, die in Datenbanken wie der freizugänglichen Datenbank ProBas des Umweltbundesamtes [18] oder der lizenzierungspflichtigen Datenbankecoinvent zur Verfügung gestellt wird.

#### 4 LITERATUR

- [1] **VDI 2243:2002-07:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling-orientierte Produktentwicklung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] **Europäische Kommission (2016):** Waste Framework Directive (2008/98/EC) or Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives [abgerufen am: 11.11.2018].
- [3] **Beitz, W. (1996):** Recyclinggerechtes Gestalten. In: Nickel, W., Hg. Recycling-Handbuch: Springer, S. 32-87, ISBN 978-3-642-95768-0.
- [4] **Apple (2018):** Materialien, neu gedacht [online]. Apple [abgerufen am: 12.11.2018], verfügbar unter: <https://www.apple.com/de/environment/resources/>
- [5] **Fairphone (2017):** How recyclable is the Fairphone 2 [online]. Fairphone, 27. Februar 2017 [abgerufen am: 12.11.2018], verfügbar unter: <https://www.fairphone.com/de/2017/02/27/recyclable-fairphone-2/>
- [6] **IFIXIT (2015):** Fairphone 2 Teardown [online]. IFIXIT, 18. November 2015 [abgerufen am: 12.11.2018], verfügbar unter: <https://de.ifixit.com/Teardown/Fairphone+2+Teardown/52523>
- [7] **Wilts, C. H.; Lucas, R.; Gries, N. v. und Zirngiebl, M. (2015):** Recycling in Deutschland: Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze [online]. Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie [abgerufen am: 11.11.2018], verfügbar unter: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5746>
- [8] **Bloemen, K. (2017):** Klima-und energieeffiziente Bereitstellung von Flüssigaluminium für den Druckgießprozess, kassel universi-ty press GmbH. 15, ISBN 373760326X.
- [9] **Umweltbundesamt (2017):** Kunststoffabfälle: Alle Farben sollen ins Recycling [online]. Umweltbundesamt, 8. Dezember 2017

- [abgerufen am: 05.11.2018], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/kunststoffabfaelle-allefarben-sollen-ins-recycling>
- [10] **Schnideritsch, H.; Luidold, S.; Angerer, T.; Fasching, M.-J. und Antrekowitsch, H. (2012):** Problematik der Aufbereitung von RFIDs. In: Recycling und Rohstoffe, Hrsg. Thomé-Kozmiensky, Karl J, 625-636.
- [11] **Ringle, A. (2018):** Zweites Leben für alte Windräder [online]. Spiegel Online, 12. April 2018 [abgerufen am: 12.11.2018], verfügbar unter: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/recycling-zweites-leben-fuer-alte-windraeder-a-1202572.html>
- [12] **Circular Fashion (2018):** Circular Fashion [online]. Circular Fashion [abgerufen am: 20.11.2018], verfügbar unter: <https://circular.fashion/>
- [13] **Pimmler, T. U. und Eppinger, S. D. (1994):** Integration analysis of product decompositions. In: Proceedings der sechsten ASME Design Theory and Methodology Conference.
- [14] **Dahmus, J. B.; Gonzalez-Zugasti, J. P. und Otto, K. N. (2001):** Modular product architecture. In: Design studies, 22(5), 409-424.
- [15] **Krause, D. und Gebhardt, N. (2018):** Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien. In: Krause, D. und Gebhardt, N., Hg. Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Heidelberg: Springer-Verlag, S. 157-242, ISBN 978-3-662-53040-5.
- [16] **Giegrich, J.; Oberender, C.; Tennikat, M.; Denz, W.; Niebaum, A. und Lahl, U. (2014):** Messung von Ressourceneffizienz als wesentliche Voraussetzung für Effizienzsteigerungen - Die VDI-Richtlinienreihe 4800 Ressourceneffizienz als ein Ansatz zur Bewertung und Verbesserung. In: uwf UmweltWirtschaftsForum, 22(2-3), 139-145. ISSN 0943-3481. doi:10.1007/s00550-014-0331-6

- 
- [17] **VDI 4800 Blatt 2:2018-03:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwandes, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [18] **Umweltbundesamt (2015):** Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (ProBas) [online]. Umweltbundesamt, 12. Februar 2015 [abgerufen am: 14.11.2018], verfügbar unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>
- [19] **VDI 4600:2012-01:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden, Beuth Verlag GmbH, Berlin.