

# Bewertung der recyclinggerechten Gestaltung von Konstruktionen und Produkten



Kirchner, J.-S.; Prumbohm, M.

*Die Recyclingeignung eines Bauteiles, einer Baugruppe oder eines Produktes lässt sich durch verschiedene Maßnahmen im Laufe des Konstruktionsprozesses steigern. Diese werden gesammelt, aufgelistet und hinsichtlich Faktoren wie der Umsetzbarkeit und des Verbesserungspotentials bewertet. Diese Einordnung bildet die Grundlage für ein Bewertungsverfahren, mit dem sich die Produktgestaltung zügig und vergleichsweise präzise hinsichtlich ihrer Recyclingeignung beurteilen lässt. Das Bewertungsverfahren wird an Hand eines konstruktiven Beispiels mit eingeschränkter Recyclingeignung demonstriert. Die vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclingeignung werden an diesem Beispiel angewendet und die Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen werden mit Hilfe der Bewertungsmethode deutlich erkennbar.*

*The recycling suitability of a component, a module or a product can be enhanced through various measures during the construction process. These measures are collected, listed and evaluated in reference to factors such as the feasibility and the potential for improvement of the recycling suitability. With this classification an evaluation procedure is developed which gives us an easy, quick and comparatively accurate overview of the current recycling suitability of a product. The evaluation process is demonstrated by a constructive example with a restricted recycling suitability. The effect of the taken steps is determined by the evaluation method clearly.*

## Recyclinggerechte Produktgestaltung

Die Bedeutung der Gewinnung von Sekundärrohstoffen, also dem Recycling von Produkten am Ende des Lebenszyklus, gewinnt seit Jahren an Bedeutung. Die dabei entstehenden Kosten werden von der konstruktiven Gestaltung der Produkte stark beeinflusst. Vor der Betrachtung von Gestaltungsrichtlinien, die das Recycling der Produkte begünstigen, wird der Begriff des Recyclings betrachtet.

Bei dem Begriff des Recyclings handelt es sich um ein Lehnwort aus dem Englischen, das sich wiederum aus der lateinischen Vorsilbe „Re-“, (zurück) und dem griechischen Wort für Kreis (kyklos) zusammensetzt. Daher wird im Deutschen der Begriff der Rezyklierung passend verwendet. Laut VDI-Richtlinie 2243 versteht man unter dem Begriff des Recyclings die „erneute Verwendung

oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen“ /1/.

Entsprechend zu dieser Definition lassen sich in einem nächsten Schritt die verschiedenen Recyclingarten in Abhängigkeit der Beibehaltung der Produktgestalt gliedern, s. Abbildung 1. Der Begriff des Produktrecyclings umfasst dabei die Verwendung von Produkten als Gebrauchtware für denselben (Wiederverwendung) oder einen anderen (Weiterverwendung) Verwendungszweck. Daneben beinhaltet das Materialrecycling die Verwertung der im Produkt enthaltenen Stoffe im gleichen Produktionsprozess wie bei der Produktentstehung (Wiederverwertung) oder der Verwertung in einem weiteren Produktionsprozess (Weiterverwertung).

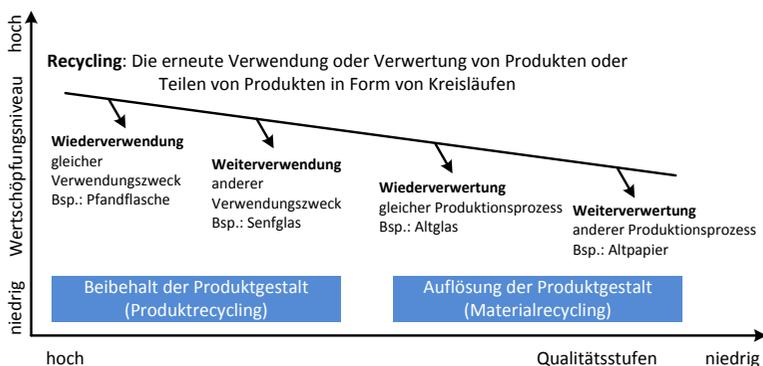


Abbildung 1: Übersicht der Recyclingarten in Abhängigkeit von der Beibehaltung der Produktgestalt und dem Wertschöpfungsniveau /2/

Die Gestaltung der Produkte beeinflusst sowohl das Produktrecycling, als auch das Materialrecycling. Die Gliederung der Maßnahmen zur recyclinggerechten Produktgestaltung entsprechend dieser Anordnung bietet sich an. Der Konstruktionsprozess lässt sich damit gezielt auf einen langen Produktlebenszyklus (Maßnahmen für das Produktrecycling) oder auf eine erleichterte Verwertbarkeit der verwendeten Materialien (Maßnahmen für Materialrecycling) ausrichten. Dabei können die Maßnahmen, die ein Produktrecycling begünstigen, auch einen positiven, sekundären Effekt auf das Materialrecycling aufweisen. Diese Zusammenhänge werden in der folgenden gegliederten Auflistung in den Anmerkungen berücksichtigt.

### Produktrecycling

Verwendung lösbarer Verbindungselemente: Erleichtern die Demontage und damit die Reparatur defekter Bauteile. Eine Verlängerung des Lebenszyklus ist die Folge. Das Materialrecycling wird ebenfalls begünstigt, die zügige und damit

günstige endgültige Demontage erleichtert die Separierung der Bauteile nach Werkstoffen. Beispiel: Schnappverbindungen wie beispielsweise Biegefedern /3/.

Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen und erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen: Analog zur Verwendung ausschließlich leicht lösbarer Verbindungselemente hat die Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen vergleichbare Auswirkungen. Beispiele: einzelnes, zentrales Verbindungselement für Zahnriemenabdeckungen /4/; Radmuttern im Motorsport /5/.

Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente: Neben der Reduzierung der Verbindungselemente verlängert auch die Verwendung von alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente die Dauer des Lebenszyklus der Produkte und Bauteile. Beispiele: Schraubverbindungen mit aufgesteckten Kunststoffkappen oder isolierende Materialien zwischen zu verbindenden Bauteilen /6/.

Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen: Durch die Nutzung von Standardteilen lässt sich der Montage- und Demontageaufwand verringern. Dies kann durch den erleichterten Austausch von Bauteilen zu einer verbesserten Wiederverwendung des Produktes führen. Ebenfalls wie die Verwendung leicht lösbarer Verbindungselemente, lässt sich das Materialrecycling durch diese Maßnahme und die daraus folgende erleichterte Demontierbarkeit ebenfalls verbessern. Beispiel: einheitliche Schraubenart und –größe im gesamten Produkt.

Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil und Bildung von variantenneutralen Baugruppen: Der leichte Austausch von Produktbestandteilen erleichtert die Wiederverwendung und verlängert den Lebenszyklus des Produktes. Eine spätere Verwertung wird ebenfalls erleichtert, die Baugruppen werden getrennt bzw. das Basisteil ist separierbar und kann gezielt dem Materialrecycling zugeführt werden. Beispiele: Modular aufgebautes Smartphone „Project Ara“ /7/; Modulares Kamerasystem „ALPA-12“ /8/.

Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen und unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe: Lassen sich Gift- und Gefahrstoffe oder auch Baugruppen mit Verbrauchsmaterial einfach demontieren und ersetzen, verlängert sich der Produktlebenszyklus des Produktes erheblich. Gleiches gilt für wiederverwertbare Bauteile. Die entnommenen Bauteile und –gruppen lassen sich gezielt einer entsprechenden Weiterverwendung oder einer Verwertung der Materialien zuführen. Beispiele: Ölfilter mit wechselbarem Filtereinsatz /3/; Separate Tonerkassette bei Laserdruckern /9/.

Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung: Die Bereitstellung von Demontageinformationen oder Informationen zur Wiederverwendung durch den Hersteller erleichtert Reparaturen durch den Anwender, wodurch jedoch der Anspruch auf Gewährleistung meist verloren geht. Neben dieser Verbesserung auf Produktebene erleichtern Demontageinformationen für Entsorgungsbetriebe die Entnahme von Gebrauchtteilen

sowie die Sortierung der Bauteile entsprechend der verwendeten Materialien. Beispiele: International Dismantling Information System (IDIS) für PKW /10, 11/; iFixit-Internetdatenbank /12/.

Ermöglichung der Bauteilauferarbeitung: Die geplante Aufarbeitung von abgenutzten Baugruppen und -teilen ermöglicht die Wiederverwendung eines Produktes. Beispiele: runderneuerte Autoreifen /13/; Motor- und Getriebegehäuse /3/.

### *Materialrecycling*

Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung: In erster Linie wird die Demontage am Ende des Lebenszyklus erleichtert. Aber auch der Austausch von Ersatzteilen und damit die Reparatur und die daraus folgende Wiederverwendung werden damit erleichtert. Beispiele: Kaffeemaschine /6/; Bürostuhl /3/.

Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise: Mit der Integralbauweise ist die Zusammenfassung verschiedener Funktionen in einem Bauteil gemeint. Werden verschiedene Funktionen mit einem Bauteil aus einem Werkstoff bzw. möglichst wenigen Werkstoffen erfüllt, begünstigt dies das Materialrecycling. Die Differentialbauweise hingegen kann die recyclinggerechte Produktgestaltung hinsichtlich einfacher Demontierbarkeit durch lösbare Verbindungen und einfacher Separierbarkeit der Werkstoffe oder wiederverwendbarer einzelner Bauteile verbessern. Beispiele: Schraube mit integrierter Unterlegscheibe /6/; Integralbauweise im modernen Flugzeugbau /14/.

Erleichterte zerstörende Demontage: Im Laufe des für das Materialrecyclings grundlegenden Zerkleinerungsprozesses werden Bauteile an konstruktiv definierten Stellen voneinander getrennt. Werkstoffe lassen sich anschließend leichter trennen und verwerten. Beispiele: Sollbruchstellen, z.B. an PKW-Stoßfängern /3/.

Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien: Diese lassen sich vollständig verwerten und in einigen Fällen wiederverwenden /3/. Beispiel: Naturfasern im PKW /15/.

Verringerung der Werkstoffvielfalt: Je mehr Werkstoffe in den einzelnen Bauteilen verwendet werden, desto größer ist der Aufwand zur Sortierung und Klassierung dieser. Eine Verringerung der Werkstoffvielfalt erleichtert die Verwertung der Stoffe im Anschluss an die Produktzerkleinerung. Beispiel: Toastauswurf ohne Nietverbindungen /16/.

Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen: Eine hohe Anzahl verschiedener Werkstoffe in einem Produkt hat häufig Werkstoffpaarungen zur Folge, die für das Recycling ungeeignet sind. Sind diese im Konstruktionsprozess bekannt und können durch Werkstoffsubstitution vermieden werden, verbessert dies die Möglichkeiten des Materialrecyclings deutlich. Beispiele für unverträgliche Werkstoffkombinationen: Verbundwerkstoffe wie glasfaserverstärkte Kunststoffe oder unverträgliche Kunststoffe (PE & PET beispielsweise) /6/.

Verwendung von Rezyklaten: Werden Werkstoffe verwendet, die sich wieder- bzw. weiterverwerten lassen, verbessert dies das Materialrecycling. Die gezielte Verwendung von Sekundärrohstoffen bietet neben einer Kostensenkung im Vergleich zu Primärrohstoffen auch den Reiz einer Kreislaufwirtschaft. Die verwendeten Rezyklaten können mit der Verwertung des neuen Produktes wieder zurück in den Kreislauf gehen. Beispiele: Wiederverwertung von Polyamid, beispielsweise in Handgriffen /3/; Zerkleinerte Duroplaste als Füllmaterial /3/.

Bereitstellung von Werkstoffinformationen: Bei Kunststoffbauteilen wird die präzise Kennzeichnung des verwendeten Werkstoffes bereits angewendet und erleichtert somit die Sortierung und eine Verwertung der Stoffe. Indirekt ist eine Kennzeichnung in der Stückliste möglich und üblich.

### Bestehende Bewertungsmethoden

Während der Produktentwicklung werden Bewertungsmethoden angewandt, welche die Recyclingeignung von Bauteilen, Baugruppen oder Gesamtprodukten erfassen und damit eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Varianten zulassen. Im Folgenden werden drei bestehende Bewertungsmethoden aufgelistet und erläutert.

*Checklisten nach VDI-Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung“*

Einfache und grobe Checklisten dienen vor allem dazu, die Umsetzung möglichst vieler Maßnahmen und Richtlinien zur Erstellung recyclinggerechter Produkte zu kontrollieren, eventuell den Umsetzungsgrad zu bewerten und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Das Bauteil, die Baugruppe oder das Gesamtprodukt wird hinsichtlich Recyclingkriterien betrachtet und eingeschätzt, siehe Abbildung 2.

Technische Recycling-Kriterien	Bewertung	Optimierungs-Potenzial durch
Stoffliche Verwertbarkeit	recyclingfähig, gleiche Eigenschaften	keine Optimierung nötig
	recyclingfähig, mindere Eigenschaften	Einsatz höherwertiger Werkstoffe prüfen
	nicht verwertbar, Beseitigung nötig	recyclingfähige Werkstoffe verwenden
Verwertungs-kompatibilität	kompatibel, gleiche Eigenschaften	keine Optimierung nötig
	kompatibel, mindere Eigenschaften	eventuell Stoffvielfalt optimieren
	nicht kompatibel	verträgliche Werkstoffe verwenden
Identifizierbarkeit	eindeutig, einfach, maschinenlesbar	keine Optimierung nötig
	gut separierbar, keine Kennzeichnung	mindestens Kennzeichnung vorsehen
	nicht möglich, keine Kennzeichnung	vermeiden, Kennzeichnung vorsehen
Recyclingkritische Stoffe	nicht vorhanden	keine Optimierung nötig
	vorhanden, gekennzeichnet, gut separierbar	dauerhaft gute Lesbarkeit sichern
	vorhanden, unseparierbar, Beseitigung nötig	vermeiden, Kennzeichnung und Demontage vorsehen
Schad- und Gefahrstoffe	nicht vorhanden	keine Optimierung nötig
	vorhanden, gut separierbar	mindestens Kennzeichnung vorsehen
	vorhanden, unseparierbar, Beseitigung nötig	vermeiden, Kennzeichnung und Demontage vorsehen

Abbildung 2: *Checkliste für die Abschätzung des Optimierungsbedarfes hinsichtlich der Recyclinggerechten Gestaltung nach VDI-Richtlinie 2243*

Für jedes technische Produkt ergeben sich beim Durchlaufen und Einordnen der Kriterien eine Reihe von Handlungsempfehlungen, die nach ihrer Umsetzung dazu beitragen, dass Produkt recyclinggerechter zu gestalten.

### Gleichungsbasierte Ermittlung der Komponenten-Kreislaufeignung nach VDI 2243

Neben der Nutzung von Checklisten zur Bewertung der Recyclingeignung sieht die VDI-Richtlinie auch die ökonomische Analyse mit Hilfe rechnerisch ermittelter Recyclingkriterien vor, siehe Abbildung 3.

Gleichung: 
$$KE_K = \frac{\text{Kosten Neuteil} + \text{Beseitigungskosten in €}}{\text{Recycling-Kosten Altteil in €}} \quad (1)$$

Erklärung:  $\text{Kosten Altteil} = \text{Kosten (Demontage + Aufarbeitung + Logistik)}$

**Die Komponente ist kreislaufgeeignet, d.h. wirtschaftlich wiederverwertbar, wenn  $KE_K > 1$  ist.**

Beispiel:

Schrittmotor, Gewicht 1 kg: (verwendete Werte unterliegen den Marktschwankungen)

Demontageschritte:	12 Schrauben lösen à 3,0 s = 36,0 s	= - 0,37 €
	3 Stecker abstecken à 1,5 s = 4,5 s	= - 0,05 €
	3 Teile entnehmen à 4,0 s = 12,0 s	= - 0,12 €
Aufbereitung (Reinigung, Prüfung, usw.)		= - 5,11 €
Logistik (Registrierung, Transport, Vereinnahmung)		= - 0,51 €
Neuteil		= -15,34 €
Beseitigung (Metallerlös)		= + 0,31 €

Rechnung: 
$$KE_K = \frac{(-15,34) + 0,31 \text{ in €}}{(-0,37) + (-0,05) + (-0,12) + (-5,11) + (-0,51) \text{ in €}} = 2,44$$

Ergebnis: Für dieses Beispiel ist es sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht besser, den vorhandenen Schrittmotor aufzuarbeiten und erneut zu verwenden.

Abbildung 3: Berechnung der Komponenten-Recyclingeignung

Anhand der Gleichung zur Komponenten-Kreislaufeignung  $KE_K$  lässt sich berechnen, ob für ein definiertes Gerät, Bauteil oder eine Baugruppe die Aufarbeitung und erneute Verwendung wirtschaftlich sinnvoll ist. Dabei wird die Summe der Beseitigungskosten der vorhandenen, sowie die Beschaffungskosten der neuen Komponente im Verhältnis zu den Kosten der Aufarbeitung zur Weiternutzung der vorhandenen Komponente gesetzt. Eine Kreislaufeignung ergibt sich, wenn der berechnete Wert größer 1 ist. Analog ist auch eine Berechnung der Material-Kreislaufeignung möglich /16/. Diese Kennzahlen dienen der Bewertung des Gesamtproduktes in Hinblick auf dessen Recyclingeignung und ermöglichen auch eine Vergleichbarkeit von Komponenten und Materialien.

### Ökobilanz nach ISO 14040

Die Erstellung von Ökobilanzen ist in den Normen nach DIN EN ISO 14040 ff. einheitlich beschrieben. Die Methodik ist aufwendig, da Daten des gesamten Produktlebenszyklus für Baugruppen und Produkte ermittelt werden müssen. Es werden alle Umwelteinwirkungen des jeweiligen Produkts, die während des gesamten Lebensweges (from cradle to grave/ von der Wiege zur Bahre)

beispielsweise durch Gewinnung von Rohstoffen, Energieerzeugung, Transport, Herstellung von Betriebsstoffen und Abfallbeseitigung entstehen, betrachtet /17/. Zur anschließenden quantitativen Bewertung der Ökobilanz können wiederum verschiedene Verfahren wie der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, der kumulierte Energieaufwand oder virtuelles Wasser genutzt werden. Abbildung 4 zeigt den methodischen Aufbau von Ökobilanzstudien gemäß ISO-Norm 14040.

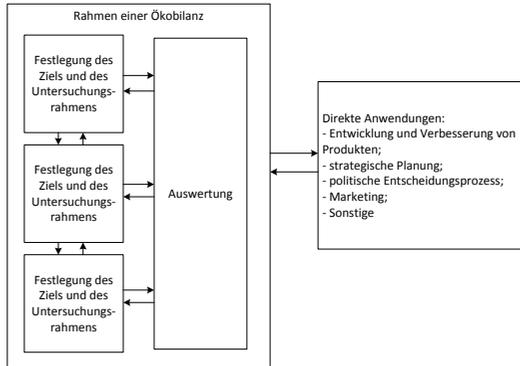


Abbildung 4: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

Bei der vorgestellten Untersuchung der Recyclingeignung von Bauteilen, Baugruppen oder Gesamtprodukten kann die Ökobilanz detailliert Aufschluss darüber geben, in welchen Lebensabschnitten Umweltbelastungen auftreten, sodass darauf während der Produktentwicklung Rücksicht genommen werden kann.

### Entwicklung einer Bewertungsmethoden

Die drei vorgestellten Bewertungsmethoden sind entweder einfach gehalten (Checklisten), aufwendig in der Aufstellung (Öko-Bilanz) oder beruhen auf einer Abschätzung der anfallenden Kosten bei der Beseitigung (Berechnung nach VDI 2243). Ziel einer Entwicklung einer eigenen Bewertungsmethode soll daher eine einfache, aber möglichst präzise Einschätzung der Recyclingeignung des aktuellen Standes der Produktgestaltung im Konstruktionsprozess sein. Als geeignet wird hierfür eine Prozentzahl angesehen, wobei 0 % eine völlig unzureichende Recyclingeignung darstellt und 100 % eine Ideallösung hinsichtlich der Recyclingeignung kennzeichnet. Um eine solche Prozentzahl zu generieren, werden die vorgestellten Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingeignung hinsichtlich ihrer Umsetzung in einer konkreten Bauteil- oder Produktgestaltung bewertet. Ist beispielsweise die Verwendung von Standardbauteilen vorgesehen? Entsprechend der Antwort wird die Umsetzung dieser

Maßnahme bewertet. Die Einzelbewertungen ergeben schließlich die Gesamtbewertung in Form einer Kennzahl.

Diese Kennzahl soll einfach und zügig aufzustellen sein und für den Konstrukteur einen Anhaltspunkt über den aktuellen Stand der Recyclingeignung geben und damit Ausgangsbasis für eine weitere Maßnahmenauswahl sein.

Als Grundlage werden die vorgestellten konstruktiven Maßnahmen hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit (Gewichtungsfaktor 4), dem Umsetzungsaufwand (Gewichtungsfaktor 2), dem Verbesserungspotential (Gewichtungsfaktor 4) sowie der Kombinierbarkeit (Gewichtungsfaktor 1) mit anderen Maßnahmen bewertet. Diese gewichtete Bewertung ergibt in der Summe eine Gewichtungspunktzahl  $G_i$  für jede einzelne Maßnahme.

In einem ersten Schritt wird bestimmt, welche der Maßnahmen sinnvoll auf das jeweilige Produkt anwendbar sind. So kann beispielsweise eine leichte Separierbarkeit von Gift- und Gefahrstoffen nur umgesetzt werden, wenn überhaupt Gift- und Gefahrstoffe verbaut sind. Die Gewichtungspunktzahlen  $G_i$  aller durchführbaren Maßnahmen  $i$  ergeben in der Summe die Zahl  $P_G$ :

$$P_G = \sum G_i \quad 1.1$$

Anschließend wird jede einzelne Maßnahme hinsichtlich der Umsetzung im aktuellen Zustand vom Konstrukteur mit einer Punktzahl von 0 bis 4 Punkten bewertet. Einer optimalen entsprechen 4 und einer komplett fehlenden Umsetzung entsprechen 0 Punkte. Diese Punktzahl wird mit dem Faktor  $\eta_r$  multipliziert, welcher sich nach folgender Formel berechnet:

$$\eta_r = \frac{G_i}{4 \cdot P_G} \quad 1.2$$

Das prozentuale Bewertungsergebnis der jeweiligen Maßnahme ergibt sich durch das Produkt der vergebenen Punkte mit dem Faktor  $\eta_r$ .

### **Anwendung des Bewertungsverfahrens**

Das Vorgehen der Bewertung der Recyclingeignung von Bauteilen und Produkten wird im Folgenden beispielhaft für einen Tablet-PC durchgeführt:

Beim iPad Air des Herstellers Apple handelt es sich um ein Verbraucher-elektronikgerät aus der Produktklasse der Tablet-Computer. Diese zeichnen sich vor allem durch eine besonders kompakte Bauweise und ein berührungsempfindliches Display aus, das nahezu die gesamte Vorderseite des Produkts einnimmt. Trotz der Neuheit dieses Produkts sind vor allem die Möglichkeiten zur Demontage

aufgrund der Verwendung von Klebeverbindungen besonders schlecht. So sind das Display und auch der im Inneren des Geräts befindliche Akkumulator mittels eines Klebstoffs mit dem Aluminiumgehäuse verbunden. Das in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Öffnen des Geräts zum Austausch von Komponenten ist nur unter sehr hohem Aufwand möglich. Dazu muss eine gezielte Erhitzung des Klebstoffs erfolgen und das abgebildete spezielle Werkzeug verwendet werden. /18/



Abbildung 5: Öffnung des iPad Air /18/

Mit diesen Eigenschaften verstößt der Aufbau des iPad Air nicht nur wie viele Wettbewerber auch gegen die per EU-Richtlinie zum Umgang mit Elektronikschrott geforderte, problemlose Austauschbarkeit von Akkumulatoren. Der Aufbau erschwert durch die aufwändige Demontage außerdem die Wieder- und Weiterverwendung wertvoller Bauteile, wie zum Beispiel des hochauflösenden Bildschirms und des Prozessors. Die Recyclingeignung des Produktes ergibt sich mit dem entwickelten Bewertungsverfahren zu knapp 46 %, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Vorgehensweise zur Bewertung der Recyclingeignung eines frei im Handel erhältlichen Tablet-Computers

$G_i$	Titel der Maßnahme	Punkte	$\eta_r$	Ergebnis
<i>Produktrecycling</i>				
38	Verwendung lösbarer Verbindungselemente	1	0,013	1,33
33	Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen	3	0,011	3,48
39	Erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen	0	0,013	0
36	Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente	3	0,012	3,78
41	Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen	2	0,014	2,88
34	Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil	3	0,011	3,57
42	Bildung von variantenneutralen Baugruppen	3	0,014	4,41

34	Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen	1	0,011	1,19
28	Leichte Separierbarkeit unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe	1	0,009	0,98
37	Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung	0	0,013	0
31	Ermöglichung der Bauteilauflarbeitung	1	0,010	1,09
Zwischensumme Produktrecycling:			22,71 %	
<i>Materialrecycling</i>				
39	Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung	4	0,014	5,48
43	Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise	3	0,015	4,53
38	Erleichterte zerstörende Demontage	2	0,013	2,66
36	Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien	3	0,013	3,78
43	Verringerung der Werkstoffvielfalt	1	0,015	1,51
33	Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen	1	0,012	1,16
40	Verwendung von Rezyklaten	2	0,014	2,8
47	Bereitstellung von Werkstoffinformationen	1	0,016	1,65
Zwischensumme Materialrecycling:			23,57 %	
Gesamtsumme Recyclingeignung der Konstruktion:			46,28 %	

Bei der konstruktiven Verbesserung ist zu beachten, dass die stark eingeschränkten Möglichkeiten zur Reparatur beim betrachteten und bei vergleichbaren Modellen im Interesse des Herstellers sind. Der Verkauf neuer Produkte ist lukrativer, als die Bereitstellung von Reparaturinformationen und der Verkauf von Ersatzteilen. So zeigt eine Untersuchung der Demontageeignung aktueller Tablet-Computer verschiedener Hersteller aus dem Jahr 2014, dass keines der betrachteten Geräte einen speziellen Öffnungsmechanismus für Reparaturzwecke besitzt /19/. Dieses Vorgehen ließe sich nur unterbinden, in dem die Hersteller von Elektronikprodukten durch gesetzliche Vorgaben zur Bereitstellung von Demontage- und Reparaturinformationen und zu einer demontagerechten Auslegung ihrer Produkte verpflichtet werden.

In diesem Fall könnte die in Abbildungen 6 und 7 dargestellte Möglichkeit zur Verbindung der oberen Glasscheibe mit dem Gehäuse (Pos. 1) eingesetzt werden. Dabei wird die Klebeverbindung zur Verbindung des Displayglases mit dem Gehäuse durch eine Kombination aus der formschlüssig mit dem Gehäuse verbundenen Glasabdeckung (Pos. 3) und Schnappverbindungen zu ersetzen. Da die Schnappverbindungen nicht direkt in der Glasscheibe integriert werden können, befinden sie sich an einem weiteren Bauteil, welches ebenfalls formschlüssig mit der Glasabdeckung verbunden ist und auch die Elektronik der berührungsempfindlichen Scheibe ins Innere des Geräts führt. Die Abdichtung des

Gehäuses gegenüber Staub und Wasser kann anstatt durch den Klebstoff mit einer umlaufenden Gummidichtung (A) erfolgen. Zur Montage werden Glasscheibe und das Bauteil mit den Schnappverbindern zusammengesteckt und die Oberkante der Glasscheibe (B) in die dafür vorgesehene Nut an der Oberkante des Gehäuses (C) geführt. Durch Herunterdrücken der Scheibe und das Einrasten der Schnappverbindungen (D) wird die Scheibe fixiert. Dabei sorgen die in das Gehäuse eingebrachte Nut (F) und ihr Gegenstück am Verbindner für eine Zentrierung. Durch Lösen der Schnappverbindungen mittels der beiden an der Gehäuseunterseite angebrachten Ausfräsungen (E) kann die Scheibe wieder leicht demontiert werden.

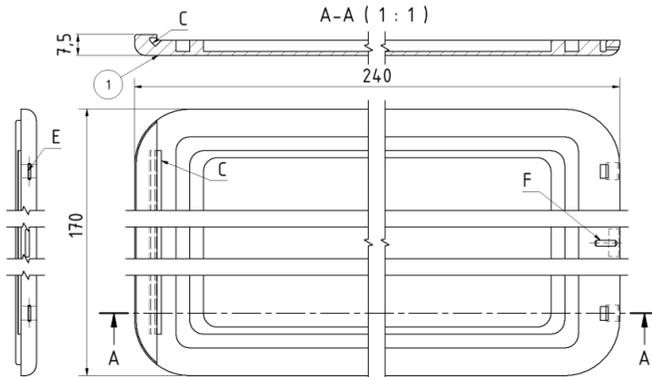


Abbildung 6: Gehäuse eines recyclinggerechten Tablet-PCs

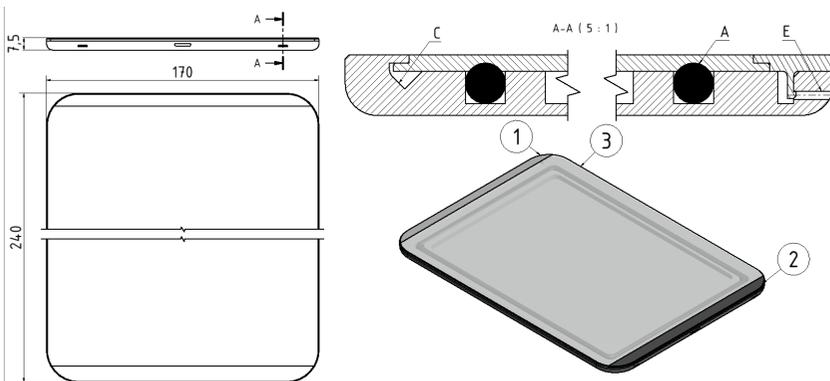


Abbildung 7: Verbesserter Tablet-PC im zusammengebauten Zustand

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Konstruktion bzw. die Auswirkungen auf die Recyclingeignung von Tablet-Computern sind in Tabelle 2 grün markiert. Der

Entwurf für eine verbesserte Konstruktion bietet mit dem Ergebnis von knapp 74 % eine Steigerung der Recyclingeignung von über 27 %.

Tabelle 2: Bewertung der Recyclingeignung eines überarbeiteten Entwurfs für einen recyclinggerechten Tablet-Computer

$G_i$	Titel der Maßnahme	Punkte	$\eta_r$	Ergebnis
<i>Produktrecycling</i>				
38	Verwendung lösbarer Verbindungselemente	4	0,013	5,32
33	Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen	3	0,012	3,48
39	Erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen	3	0,014	4,11
36	Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente	3	0,013	3,78
41	Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen	2	0,014	2,88
34	Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil	3	0,012	3,57
42	Bildung von variantenneutralen Baugruppen	3	0,015	4,41
34	Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen	3	0,012	3,57
28	Leichte Separierbarkeit unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe	3	0,0098	2,94
37	Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung	4	0,013	5,2
31	Ermöglichung der Bauteilauflarbeitung	2	0,011	2,18
Zwischensumme Produktrecycling:				41,44
<i>Materialrecycling</i>				
39	Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung	3	0,014	4,11
43	Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise	3	0,015	4,53
38	Erleichterte zerstörende Demontage	3	0,013	3,99
36	Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien	3	0,013	3,78
43	Verringerung der Werkstoffvielfalt	2	0,015	3,02
33	Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen	3	0,012	3,48
40	Verwendung von Rezyklaten	2	0,014	2,8
47	Bereitstellung von Werkstoffinformationen	4	0,016	6,6
Zwischensumme Materialrecycling:				32,31
Gesamtsumme Recyclingeignung der Konstruktion:				73,75 %

## Zusammenfassung

Die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingeignung von Produkten und Bauteilen wird in diesem Artikel durch eine umfassende Auflistung und Einordnung hinsichtlich des Produktrecyclings sowie des Materialrecyclings dargestellt. Die einzelnen Maßnahmen werden hinsichtlich Ihrer Allgemeingültigkeit, der Umsetzbarkeit, des Verbesserungspotentials und der Kombinierbarkeit mit anderen Maßnahmen bewertet. Diese Bewertung dient als Grundlage für eine einfache und schnelle Bewertungsmethode, die es dem Konstruierenden erlaubt, im laufenden Konstruktionsprozess die Recyclingeignung des Produktes oder einzelner Bauteile an Hand einer Prozentzahl einzuschätzen. Änderungen und einzelne Maßnahmen lassen sich damit vergleichen. Optimierungsbedarf besteht in der Gewichtung der Bewertung der einzelnen Maßnahmen, beispielsweise der Informationsbereitstellung im Vergleich mit der erleichterten zerstörenden Demontage. Verbesserungen der Bewertungsmethode sollten nach Möglichkeit in Verbindung mit praktischer Erprobung und Beurteilung des Recyclings des entsprechenden Bauteiles erfolgen.

## Literatur

- /1/ Verein Deutscher Ingenieure: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002
- /2/ Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf [Hrsg.]: Handbuch Konstruktion. München: Hanser, 2012
- /3/ Kurz, Ulrich; Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen - Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004
- /4/ Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf [Hrsg.]: Handbuch Konstruktion. München : Hanser, 2012
- /5/ Auto, Motor und Sport: Formel 1-Technik: Die Radmutter. Internet, 2010; URL: [www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-radmutter-1813653.html](http://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-radmutter-1813653.html)
- /6/ Kahmeyer, Martin; Rupprecht, Reinhard: Recyclinggerechte Produktgestaltung. 1. Aufl. Würzburg : Vogel Buchverlag, 1996
- /7/ Project ARA. <http://www.projectara.com>. Internet, 2015
- /8/ Alpa of Switzerland: Die ALPA-12-Plattform. Internet, 2014 (<http://www.alpa.ch/de/products/cameras/camera-bodies/alpa-12-tc.html>)
- /9/ Kyocera-Mita Deutschland GmbH: Verantwortung Zukunft. Das Umweltmanagement von Kyocera. Meerbusch, 2007. – Firmenschrift

- /10/ Honda Motor Europe Ltd: Umweltgerechte Aufbereitung. Internet, 2014 (<http://www.environment.honda-eu.com/recycling/Germany/German/efrec.htm>)
- /11/ IDIS: International Dismantling Information System: Internet, 2014 (<http://www.idis2.com>)
- /12/ iFixit: Nikon D3200 LCD Screen Replacement. Internet, 2014 URL: <https://ifixit.com/Guide/Nikon+D3200+LCD+Screen+Replacement/29841>
- /13/ ProReifen.com: Wie entsteht ein runderneuerter Reifen? Internet, 2012 (<https://www.proreifen.com/tires.php>)
- /14/ Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10. Aufl. Kassel : Springer Vieweg, 2013
- /15/ Daimler AG: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse. Stuttgart, 2013. – Firmenschrift
- /16/ Verein Deutscher Ingenieure: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2002
- /17/ Norm DIN EN ISO 14040 November 2009. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
- /18/ iFixit: iPad Air Wi-Fi Battery Replacement. Internet, 2014. URL: (<https://ifixit.com/Guide/iPad+Air+WiFi+Battery+Replacement/25869>)
- /19/ Schischke, K.; Nissen, N. F.; Stobbe, L.; Oerter, M.; Scheiber, S.; Schlösser, A.; Dimitrova, G.; Genz, P.; Lang, K.-D.: Ansätze zur stofflichen Verwertung von Tablets aus Sicht des Produktdesigns. Beitrag im Tagungsband: Recycling und Rohstoffe – Band 7. Neuruppin : TK Verlag, 2014