

TEXTE

24/2021

Teilbericht

Einsatz von Post-Consumer- Recycling-Kunststoffen in energieverbrauchsrelevanten Geräten

Kurzexpertise im Rahmen des Refoplan-Vorhabens
„Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung der
Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchs-
kennzeichnungsverordnung - Viertes Arbeitsprogramm“

von:

Karsten Schischke, Anton Berwald, Gergana Dimitrova, Christian Clemm
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (Fraunhofer IZM), Berlin

Lisa Rödiger, Dirk Jepsen
Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 24/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3719 37 305 0

FB000507/ZW

Teilbericht

Einsatz von Post-Consumer-Recycling- Kunststoffen in energieverbrauchsrelevanten Geräten

Kurzexpertise im Rahmen des Refoplan-Vorhabens
„Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung der
Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchs-
kennzeichnungsverordnung - Viertes Arbeitsprogramm“

von

Karsten Schischke, Anton Berwald, Gergana Dimitrova, Christian Clemm
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
(Fraunhofer IZM), Berlin

Lisa Rödig, Dirk Jepsen

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Ökopol – Institut für Ökologie und Politik
Nernstweg 32-34
22765 Hamburg

Abschlussdatum:

Dezember 2020

Redaktion:

Fachgebiet III 1.3 Ökodesign, Umweltkennzeichnung, umweltfreundliche Beschaffung
Dr. Thomas Ebert

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Einsatz von Post-Consumer-Recycling-Kunststoffen in energieverbrauchsrelevanten Geräten

Die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG bietet den geeigneten rechtlichen Rahmen, um mithilfe von rechtlichen Instrumenten den Einsatz von Kunststoffrecyklaten in energieverbrauchsrelevanten Produkten zu erhöhen und hierdurch zu einer verbesserten Kreislaufführung von Kunststoffen beizutragen. Ein mögliches Instrument ist eine verbindliche Rezyklateinsatzquote. Im Rahmen der Kurzexpertise wurde die Machbarkeit einer solchen Rezyklateinsatzquote untersucht. Hierzu wurde der gegenwärtige Stand des Einsatzes von Post-Consumer-Recycling-Kunststoffen (PCR-Kunststoffen) in Elektro- und Elektronikgeräten, die damit verbundenen Herausforderungen und Potenziale sowie die Möglichkeiten und Grenzen aktuell verfügbarer Nachweissysteme recherchiert und analysiert. Auf Basis der Ergebnisse wurden Empfehlungen für die Stärkung des Einsatzes von Kunststoffrecyklaten unter der Ökodesign-Richtlinie abgeleitet.

Abstract: Usage of Post-Consumer-Recycling Plastics in Energy-related Products

The Ecodesign Directive 2009/125/EC provides the appropriate legal framework for increasing the use of plastic recyclates in energy-related products via regulatory instruments and thus improving the closing of material cycles. One possible instrument is a binding quota for the use of recycled plastics. In this expert report, the feasibility of such a quota was examined. To this end, the current status of the use of post-consumer recycled plastics (PCR plastics) in electrical and electronic equipment, associated challenges and potentials as well as the possibilities and limits of currently available verification systems were researched and analysed. On the basis of the results, recommendations were derived for strengthening the use of recycled plastics under the Ecodesign Directive.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	11
Summary.....	13
1 Zielsetzung.....	15
2 Einleitung.....	16
3 Bestehende Kennzeichnungs-, Nachweissysteme und Standards.....	18
3.1 DIN EN 15343:2008-02 Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung der Konformität und des Rezyklatgehalts.....	18
3.2 European Certification of Plastics Recycling – EuCertPlast.....	18
3.3 Blauer Engel.....	19
3.4 DIN CERTCO.....	20
3.5 UL ECVP 2809, Environmental Claim Validation Procedure (ECVP) for Recycled Content...	20
3.6 RAL-GZ 720, % Recycling Kunststoff.....	21
3.7 EPEAT-Kriterien und IEEE 1680 Standards.....	21
3.7.1 Fernseher.....	22
3.7.2 Bildgebende Geräte.....	23
3.7.3 Computer und Displays.....	23
3.7.4 Überprüfung der Einhaltung der EPEAT-Kriterien.....	24
3.8 DIN EN 45557:2020 Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten.....	25
3.9 Zwischenfazit.....	26
4 Ist-Stand des Einsatzes von PCR-Kunststoffen: Anforderungen, Verfügbarkeit und Produktbeispiele.....	28
4.1 Materialanforderungen.....	28
4.2 Schadstoffanforderungen.....	30
4.3 Materialverfügbarkeit.....	31
4.4 Anwendungsbeispiele.....	34
5 Design from Recycling: Hemmnisse, Grundsätze und Vorgehen.....	39
5.1 Iterativer Prozess.....	39
5.1.1 Materialauswahl.....	40
5.1.2 Bauteilgeometrie.....	40

5.1.3	Formwerkzeug	41
5.1.4	Herstellungsprozess	41
5.2	Beispielhafte PCR-Roadmap für Haushaltsgeräte.....	41
5.3	Beurteilung der Komplexität des Umstellungsprozesses.....	42
5.4	Materialqualitäten	42
5.5	Zwischenfazit.....	43
6	Eignung ausgewählter Produktgruppen für eine Rezyklateinsatzquote	44
7	Fazit	47
8	Empfehlungen für Anforderungen unter der Ökodesign-Richtlinie.....	49
9	Quellenverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteil EPEAT-gelisteter Produkte, die optionale PCR-Kriterien erfüllen	24
Abbildung 2:	Berechnung des Rezyklatanteils nach DIN EN 45557	26
Abbildung 3:	Einflussfaktoren auf die Qualität von PCR-Kunststoffen.....	29
Abbildung 4:	Veränderung des Wareneingangs des EAG-Recyclers MGG Polymers, 2011-2019.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	EPEAT-Kriterien in Bezug auf den Kunststoff-Rezyklat-Einsatz (Zusammenstellung Fraunhofer IZM).....	22
Tabelle 2:	Computer und Displays - EPEAT-Kriterium 4.2.1.2.....	23
Tabelle 3:	Pre- und Post-Consumer-Kunststoffe nach DIN EN 45557 (Zusammenstellung Fraunhofer IZM).....	26
Tabelle 4:	Kunststoffanteile ausgewählter Geräte-Kategorien (Quelle: EERA / MGG Polymers).....	32
Tabelle 5:	Recycling-Unternehmen für EAG- und ELV-Kunststoffe in Europa (Auswahl)	34
Tabelle 6:	Einführung von Kunststoff-Rezyklaten am Beispiel von Lenovo	35
Tabelle 7:	PCR-Kunststoffe in Philips-Produkten	37
Tabelle 8:	Randbedingungen für den ABS-Einsatz	37
Tabelle 9:	Hemmnisse für den Einsatz von PCR-Kunststoffen in Elektro- und Elektronikgeräten	39
Tabelle 10:	Eignung ausgewählter Produktgruppen in Bezug auf eine Rezyklateinsatzquote.....	45
Tabelle 11:	Computer – Vorschläge für Minimum-Anforderungen an den PCR-Gehalt unter der Ökodesign-Richtlinie (in Anlehnung an EPEAT-Kriterium 4.2.1.2)	49

Abkürzungsverzeichnis

2K	2-Komponenten-...
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CRT	Cathod Ray Tube (engl. für Kathodenstrahlröhrenbildschirm)
DecaBDE	Decabromdiphenylether
DIN	Deutsche Industrienorm
EAG	Elektro- und Elektronikaltgerät(e)
EERA	European Electronics Recyclers Association
ECVP	Environmental Claim Validation Procedure
ELV	End-of-life vehicle (engl. für Altfahrzeug)
EN	Europäische Norm
EPEAT	Umweltsiegel „Electronic Product Environmental Assessment Tool“
EPS	Expandiertes Polystyrol
EuCertPlast	European Certification of Plastics Recycling
EVK	Energieverbrauchskennzeichnung
HIPS	High impact polystyrene (engl. für hochschlagfestes Polystyrol)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization (engl. für Internationale Standardisierungs-Organisation)
IT	Informationstechnik
IZM	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
KF	Konsultationsforum
KOM	EU-Kommission
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PCR	Post-Consumer Recycling-...
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PIR	Post-industrielles Recycling
PolyCE	Projekt „Post-Consumer High-tech Recycled Polymers for a Circular Economy“
POP-VO	Verordnung über persistente organische Schadstoffe
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid

REACH-VO	Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
RL	Richtlinie
RoHS-RL	Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
SRI	Selbstregulierungsinitiative
UBA	Umweltbundesamt
UL	Underwriters Laboratory
UV	Ultraviolett
UZ	Umweltzeichen
VO	Verordnung

Zusammenfassung

Die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG bietet den geeigneten rechtlichen Rahmen, um mithilfe von rechtlichen Instrumenten den Einsatz von Kunststoffzyklen in energieverbrauchsrelevanten Produkten zu erhöhen und hierdurch zu einer verbesserten Kreislaufführung von Kunststoffen beizutragen. Ein mögliches Instrument ist eine verbindliche Rezyklateinsatzquote. Die vorliegende Kurzexpertise verfolgte das Ziel, die Machbarkeit einer solchen Rezyklateinsatzquote zu untersuchen. Sie ist eine Teilleistung im Rahmen des Refoplan-Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung – Viertes Arbeitsprogramm“ (FKZ 3719 37 305 0).

Diese Kurzexpertise basiert auf einer umfassenden Recherche und Analyse des gegenwärtigen Stands des Einsatzes von PCR-Kunststoffen in Elektro- und Elektronikgeräten und der damit verbundenen Herausforderungen und Potenzialen sowie der Möglichkeiten und Grenzen aktuell verfügbarer Nachweissysteme. In die Analyse sind darüber hinaus die Ergebnisse eines Fachgesprächs am 20.10.2020 unter Beteiligung von Herstellern von Elektro- und Elektronikgeräten, Herstellern von Kunststoffzyklen, Recyclern, Marktüberwachungsbehörden und Zertifizierungsorganisationen eingegangen.

Essenziell für regulatorische Anforderungen an den Einsatz von Rezyklen ist ihre Rückverfolgbarkeit. Da sich anhand des Produktes nicht mehr bestimmen lässt, ob und in welcher Menge Kunststoffzyklen eingesetzt wurden, spielen derzeit dokumentenbasierte Nachweissysteme und Standards eine wesentliche Rolle. Hierzu zählen die DIN EN 15434 und insbesondere EuCertPlast. Teilweise definieren auch Umweltzeichen, wie der Blaue Engel oder EPEAT, Anforderungen an die Nachweisführung der PCR-Quellen und -Gehalte. Die DIN EN 45557 bietet eine harmonisierte Grundlage zur Berechnung des Anteils an recyceltem Material in Endgeräten.

Rezyklen sind in relevanten Mengen aus Elektro- und Elektronikgeräten von einer begrenzten Anzahl größerer Recycler und von einigen kleineren Unternehmen verfügbar. Ein weiterer Ausbau der Produktionskapazitäten erfolgt jedoch nur zögerlich. Der Einsatz von Kunststoffzyklen in energieverbrauchsrelevanten Geräten nimmt zu. Es gibt zahlreiche Beispiele aus dem Bereich der Haushaltskleingeräte und vereinzelt der Weißen Ware sowie Beispiele aus der Informations- und Kommunikationstechnik. Die Einführung von PCR-Kunststoffen ist für Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten ein komplexer Prozess, der zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen hat. Daher bietet sich ein iteratives Vorgehen an. Verschiedene Herstellerbeispiele zeigen bereits, dass die Industrie das Thema des Rezyklateinsatzes als einen entsprechend mittel- bis langfristigen Prozess ausgestaltet.

Zudem sind die Materialeigenschaften von Kunststoffzyklen von entscheidender Bedeutung, zumal diese auch veränderte Anforderungen an das Design von Bauteilen nach sich ziehen können, ebenso wie eine Anpassung des Verarbeitungsprozesses. Darüber hinaus ist die Standardisierung von Rezyklatqualitäten und -eigenschaften ein (in Arbeit befindlicher) wesentlicher Zwischenschritt, um eine ökonomische und technische Sicherheit hinsichtlich der verarbeiteten Materialien zu erreichen.

PCR-Kunststoffe eignen sich nach derzeitigem Stand bei weitem nicht für alle Anwendungsfälle. Oberflächen, die besonderen ästhetischen Anforderungen genügen sollen, sind nur unter bestimmten Randbedingungen mit Rezyklen umsetzbar; der Einsatz von PCR-Kunststoffen für transparente oder lebensmittelechte Teile ist derzeit (nahezu) ausgeschlossen. Bei den meisten energieverbrauchsrelevanten Produkten finden sich üblicherweise größere Kunststoffteile, die

entweder gar nicht oder zumindest im normalen Gebrauch nicht sichtbar sind, wie Rückseiten und Standflächen und sich daher für den Einsatz von PCR-Kunststoffen eher eignen.

Aus der Analyse leiten sich eine Reihe von Empfehlungen für die Stärkung des Einsatzes von PCR-Kunststoffen im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie ab: Den Besonderheiten der einzelnen Produktgruppen wäre jeweils durch produktgruppenspezifische Rezyklateinsatzquoten Rechnung zu tragen. Eine horizontale Anforderung in Form einer produktgruppenübergreifenden Rezyklateinsatzquote erscheint hingegen nicht angemessen. Eine horizontale Deklarationspflicht könnte die Datenlage zum PCR-Einsatz zunächst weiter verbessern und zusätzliche Anreize für Hersteller schaffen. Eine Nachweisführung des Rezyklatanteils auf der Basis von EuCertPlast erscheint derzeit am geeignetsten. Allerdings richtet sich dieses Zertifizierungssystem vorrangig an Recycler und deckt nicht die Schritte der Weiterverarbeitung ab.

Aufgrund des großen Anteils an IT-Geräten, die das Kriterium für PCR-Einsatz unter EPEAT erfüllen, ließe sich eine vergleichbare Anforderung unter der Ökodesign-Richtlinie für Computer stellen – und hier insbesondere für Monitore, Desktop PCs und All-in-One-Computer. Aus den derzeit anstehenden Regulierungen bzw. Revisionen bestehender Regulierungen könnte kurzfristig die Produktgruppe Computer adressiert werden.

Summary

The Ecodesign Directive 2009/125/EC provides the appropriate legal framework for increasing the use of plastic recyclates in energy-related products via regulatory instruments and thus improving the closing of material cycles. One possible instrument is a binding quota for the use of recycled plastics. In this expert report, the feasibility of such a quote was examined.

This report is based on a comprehensive research of the current status of the use of PCR plastics in electrical and electronic equipment, the associated challenges and future potentials. The analysis also includes the results of a technical meeting on October 20, 2020 with the participation of manufacturers of electrical and electronic equipment, producers of recycled plastics, recyclers, market surveillance authorities and certification organisations.

The verifiability of the recycled content is essential for regulatory measures. Since no materials analytics is in place to verify the content of recycled materials, document-based verification systems and standards play an important role. These include DIN EN 15434 and especially EuCertPlast. In some cases, environmental labels such as the Blue Angel or EPEAT also define requirements for the verification of PCR sources and contents. DIN EN 45557 provides the basis for calculating the proportion of recycled material in energy-related products. A verification of the recycled content on the basis of EuCertPlast seems to be the most promising at the moment. However, the scope of this verification is limited to the production of recyclates and does not cover the steps of further processing.

Recycled materials are available in relevant quantities from WEEE from a limited number of larger recyclers and several small companies, but further expansion of capacities is slow. Still, the use of recycled plastics in energy-related equipment is increasing. There are numerous examples from the field of small household appliances and, occasionally, white goods, as well as information and communication technology equipment. Several company examples illustrate how the industry is tackling the issue of using recycled materials as a long-term process.

The introduction of PCR plastics is a complex process that has to take numerous aspects into account. An iterative approach is advisable, but it also involves a considerable amount of time. The material properties are of crucial importance, especially since these can also result in requirements for the part design, and the manufacturing process must also be adapted. The standardization of recyclate qualities and properties is an essential intermediate step (currently in progress) to achieve economic and technical safety with regard to the processed materials. PCR plastics are by far not suitable for all applications at the current state of the art. Surfaces that are to meet special aesthetic requirements are only feasible under certain boundary conditions; the use of PCR plastics for transparent or food-safe parts is at the moment (almost) impossible. For most energy-consuming products there are usually larger plastic parts that are either not visible at all or at least not visible in normal use, such as backsides and stands and are therefore more suitable for the use of PCR plastics.

A number of recommendations for strengthening the use of PCR plastics in the context of the Ecodesign Directive have been derived from the analysis: The specificities of each product group should be taken into account, so that a horizontal requirement for a recycling rate does not seem appropriate. However, a declaration requirement in the sense of a generic requirement could initially further improve the data situation on PCR use and create incentives. Due to the large proportion of IT equipment that meets the criterion for PCR use under EPEAT, a comparable requirement under the Ecodesign Directive could be set for computers - and here in particular for monitors, desktop PCs and All-in-One computers. From the currently pending regulations or

revisions of existing regulations, the product group computers can be addressed in the short term.

1 Zielsetzung

Insbesondere im Bereich der technischen Kunststoffe funktioniert die Kreislaufwirtschaft bislang nur unzureichend. Das Recycling von Elektroaltgeräten fokussiert aus ökonomischen Gründen weitgehend auf Metalle und selten auf die Kunststofffraktionen. Eine bessere Kreislaufführung lässt sich nur erreichen, wenn der Einsatz von Kunststoffzyklaten in neuen Produkten gefördert bzw. vorgeschrieben wird. Die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG bietet dafür den geeigneten rechtlichen Rahmen. Die vorliegende Kurzexpertise verfolgte das Ziel, die Machbarkeit einer möglichen Regulierung zu untersuchen, durch die eine substantielle Nachfragesteigerung nach Post-Consumer-Recycling-(PCR)-Materialien erreicht werden kann. Dabei sollte die Machbarkeit einer Rezyklateinsatzquote für energieverbrauchsrelevante Produkte im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie untersucht werden. Insbesondere sollte geklärt werden, für welche Produkte der Einsatz von Post-Consumer-Recycling-Kunststoffen möglich und wie eine Quote zu formulieren und zu überprüfen wäre – auch im Hinblick auf internationale Materialströme. Daraus sollten Vorschläge erarbeitet werden, wie der Einsatz von Post-Consumer-Recycling-Kunststoff im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie gestärkt werden kann. Der Fokus lag dabei auf Elektro- und Elektronikgeräten, da diese den ganz überwiegenden Anteil der von der Ökodesign-Richtlinie derzeit betroffenen Produkte ausmachen. Andere Sekundärkunststoffe aus anderen Quellen wurden – soweit sie nicht in begrenztem Umfang für Elektro- und Elektronikgeräte relevant sind – nicht analysiert.

Die Analyse bezieht sich ausschließlich auf PCR-Kunststoffe aus dem mechanischen Recycling, nicht aus dem lösemittelbasierten oder chemischen Recycling. Damit wurde die Intention verfolgt, Polymere in möglichst engen – werkstofflichen – Recyclingkreisläufen zu führen, anstatt die Polymerketten aufzubrechen und über den Umweg des rohstofflichen Recyclings Polymere neu synthetisieren zu müssen. Für bestimmte Kunststofffraktionen, die zurzeit nicht werkstofflich recycelt werden können (z. B. Schwerfraktion aus der Schwimm-Sink-Trennung), könnte das chemische Recycling zukünftig jedoch möglicherweise eine sinnvolle Option darstellen. Es ist dabei jedoch ein erhöhter Material- und Energieeinsatz notwendig, weshalb zunächst die Potenziale des werkstoffliche Recyclings ausgeschöpft werden sollten.

2 Einleitung

Der Einsatz von Post-Consumer-Rezyklaten in Elektro- und Elektronikgeräten ist mit einer Reihe besonderer Herausforderungen verbunden. Dazu gehören insbesondere vielfältige materialbezogene Qualitätsanforderungen, z. B. an die Schlagfestigkeit, Zugfähigkeit, Steifigkeit, Verarbeitungsfähigkeit oder Isoliereigenschaften. Diese Anforderungen müssen auch von den Rezyklatkunststoffen erfüllt werden, wenn diese innerhalb der bestehenden Gerätedesigns und der etablierten Produktionsprozesse eingesetzt werden sollen. Eine weitere Grundvoraussetzung für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten ist die Einhaltung definierter Schadstoffgrenzwerte. Hier liegen die Herausforderungen insbesondere in der zuverlässigen Beschaffung von qualitätsgesicherten Ausgangsmaterialien, die aus entsprechend optimierten Aufbereitungsprozessen stammen.

Am Markt sind Verfügbarkeit und Preise für derartige, qualitätsgesicherte Sekundärmaterialien ausschlaggebende Faktoren für den Ersatz von Primärmaterialien. Doch auch der systematische Austausch zu veränderten Materialeigenschaften und Verarbeitungsparametern zwischen Recyclern und Herstellern sowie zu möglichen Anforderungen an das Produkt-Redesign und die Änderungen von Fertigungsprozessen können hier relevante Lösungsbeiträge leisten. Dieser Umstellungsprozess wird durch das Konzept „Design from Recycling“ adressiert, denn in der Regel ist ein einfacher Austausch eines Primärkunststoffes durch Sekundärmaterial aufgrund abweichender Materialeigenschaften nicht oder nicht unmittelbar möglich.

Im Rahmen dieser Kurzexpertise werden die aktuellen Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von PCR-Kunststoffen dargestellt und Entwicklungsperspektiven aufgezeigt.

Der neue Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission (KOM 2020) sieht eine Rechtsetzungsinitiative für eine nachhaltige Produktpolitik vor, bei der es im Kern darum geht, „die Ökodesign-Richtlinie über energieverbrauchsrelevante Produkte hinaus so zu erweitern, dass der Ökodesign-Rahmen auf ein möglichst breites Produktspektrum angewendet werden kann und zur Kreislaufwirtschaft beiträgt“. Neben anderen Aspekten soll diese Initiative auch darauf abzielen, den Rezyklatanteil in Produkten zu erhöhen, ohne deren Leistung und Sicherheit zu beeinträchtigen. Der Aktionsplan benennt nicht explizit das Ziel, den Gehalt an Kunststoffrezyklaten in Produkten im derzeitigen Geltungsbereich der Ökodesign-Richtlinie zu erhöhen, wohl aber für die Bereiche Verpackungen, Baustoffe und Fahrzeuge (ebd). Der Einsatzbereich Fahrzeuge kann dabei in Konkurrenz zum PCR-Kunststoff-Einsatz im Bereich Elektro- und Elektronikgeräte treten und Rezyklatmengen absorbieren – oder im Sinne eines Market-Pulls auch zum Ausbau von Recyclingkapazitäten führen, die dann auch die Materialverfügbarkeit für den Elektro- und Elektronikbereich verbessern. Der Aktionsplan zielt grundsätzlich auch auf verbesserte Rahmenbedingungen für den Sekundärrohstoffmarkt ab, um die Verfügbarkeit von Rezyklaten und deren Qualität zu verbessern.

In größeren Mengen werden in der EU Polyolefine recycelt, insbesondere PE und PP, des Weiteren PET, PVC und EPS. Von diesen Polymeren ist lediglich PP von größerer Relevanz für den Elektro- und Elektroniksektor, während die in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzten weiteren Kunststoffe ebenfalls recycelt werden, aber in deutlich geringeren Mengen (mehr dazu in 4.3).

Freiwillige Versprechen für einen erhöhten Einsatz an Kunststoffrezyklaten haben insbesondere auch Firmen aus dem Bereich Haushaltsgeräte abgegeben (Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU 2019). Bis 2025 sollen nach den Zielen der KOM jährlich 10 Millionen Tonnen Kunststoffe als PCR-Material branchenübergreifend wieder eingesetzt werden, im Vergleich zu weniger als 4 Millionen Tonnen in 2016.

Die vorliegende Kurzexpertise basiert auf einer umfassenden Recherche des gegenwärtigen Stands des Einsatzes von PCR-Kunststoffen in Elektro- und Elektronikgeräten, den damit verbundenen Herausforderungen und den künftigen Potenzialen. In die Analyse sind darüber hinaus die Ergebnisse eines Fachgesprächs am 20.10.2020 unter Beteiligung von Herstellern von Elektro- und Elektronikgeräten, Herstellern von Kunststoffzyklen, Recyclern, Marktüberwachungsbehörden und Zertifizierungsorganisationen eingegangen.

3 Bestehende Kennzeichnungs-, Nachweissysteme und Standards

Essenziell für regulatorische Maßnahmen, aber auch für pro-aktive Maßnahmen der Hersteller, ist eine Rückverfolgbarkeit von Rezyklaten. Da sich anhand des Produktes nicht mehr bestimmen lässt, ob und in welcher Menge Kunststoffrezyklate eingesetzt wurden, spielen Nachweissysteme und Standards eine besondere Rolle. Teilweise definieren auch Umweltzeichen Anforderungen an die Nachweisführung der PCR-Quellen und -Gehalte. Dieses Kapitel liefert einen Überblick über derartige Standards, Kennzeichnungs- und Nachweissysteme, um beurteilen zu können, ob noch Defizite bei den möglichen Rahmenbedingungen einer Nachweisführung zu konstatieren sind.

In einer Studie für ECOS wird durch Ökopol und Vito die Implementierung einer Methodik zur Rückverfolgung und Überprüfung von Rezyklatgehalten als ein zentraler „Baustein“ für eine Erhöhung des PCR-Kunststoffanteils in Produkten benannt (Fayole et al. 2019). Demnach sollten bestehende Zertifizierungsschemata und -standards zur Dokumentation der Rezyklat-Herkunft so weiterentwickelt werden, dass die Herkunft für Dritte transparent und belastbar nachvollziehbar ist.

Der Einsatz von Kunststoffrezyklaten ist als Anforderung und Bewertungskriterium bereits in einigen Umweltkennzeichen verankert, einschließlich Angaben zur Nachweisführung (Dimitrova et al. 2018). Nachfolgend erfolgt eine kurze Charakterisierung bestehender Standards und Umweltzeichen.

3.1 DIN EN 15343:2008-02 Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung der Konformität und des Rezyklatgehalts

Die DIN EN 15343 standardisiert das Vorgehen für den Ausweis des Rezyklatanteils von Kunststoffen, welche aus einem mechanischen Recycling stammen. Der Standard kann auf Zwischenprodukte, wie Kunststoffgranulate angewendet werden, bezieht sich jedoch nicht auf Endprodukte. Insbesondere definiert der Standard Anforderungen an die Managementprozesse des Recyclers:

Die Berechnung des Rezyklatgehalts eines Kunststoffes (= Produkt) erfolgt als Massenanteil:

$$\text{Prozentualer Anteil von Rezyklat im Produkt} = \frac{\text{Masse des Rezyklatanteils im Produkt}}{\text{Gesamtmasse des Produkts}} \times 100$$

Der Standard differenziert dabei nicht Pre-Consumer- und Post-Consumer-Anteile, sondern subsumiert beides im Rezyklatgehalt.

3.2 European Certification of Plastics Recycling – EuCertPlast

EuCertPlast ist ein EU-weit gültiges Zertifizierungs- und Auditingssystem für Hersteller von Rezyklatkunststoffen. Die EuCertPlast-Organisation hat Anforderungen auf Grundlage des europäischen Standards EN 15343 festgelegt und verfolgt das Ziel, die Wiederverwertung von Kunststoffen mithilfe von umweltverträglichen Verfahren zu fördern. Insbesondere wird beim Prozess Wert auf Nachverfolgbarkeit, Konformitätsprüfungen und den Nachweis des Recyclinganteils gelegt. Diese Zertifizierung wird aber nur von einigen wenigen Firmen verwendet, die Elektroaltgeräte verwerten (EuCertPlast 2020):

- bage plastics GmbH, Deutschland und Österreich

- ▶ MBA Polymers UK Ltd., Großbritannien
- ▶ MGG Polymers GmbH, Österreich

Derzeit bereitet auch das Unternehmen Coolrec mit Standorten in Belgien und den Niederlanden die Zertifizierung nach EuCertPlast vor, so dass absehbar weitere PCR-Mengen aus EuCertPlast-zertifizierten Anlagen zur Verfügung stehen.

Einige weitere EuCertPlast-zertifizierte Recycler verarbeiten ebenfalls Kunststoffe, die für den Einsatz in Elektro- und Elektronikgeräten grundsätzlich geeignet sind (insbesondere ABS und PP), die aber nicht notwendigerweise aus Elektroaltgeräten stammen.

Die in der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) vertretenen Behörden¹ erkennen EuCertPlast als offizielle Zertifizierung für Kunststoff-Rezyklathersteller an.

Zertifiziert werden sowohl der Standort des Rezyklatherstellers als auch einzelne „Produkte“. „Produkte“ sind in dem Fall einzelne Polymere, allerdings nicht differenziert für einzelne Qualitätsstufen („Grades“) von Polymeren, so dass einzelne Qualitätsstufen auch abweichende Rezyklatanteile aufweisen können. Eine chargenweise Rückverfolgbarkeit von erzeugten Rezyklaten zum eingesetzten Material muss gegeben sein.

Rezyklathersteller mit EuCertPlast-Zertifizierung sind ganz überwiegend in Europa ansässig, zumal zu den Gründungsmitgliedern mehrere europäische Verbände gehören², aber vereinzelt sind auch Rezyklathersteller aus Nicht-EU-Ländern zertifiziert (1x Malaysia, 1x Norwegen, 3x China, 1x Taiwan, 2x Türkei, 8x Großbritannien).

3.3 Blauer Engel

Die Vergabekriterien des Blauen Engels für „Produkte aus Recyclingkunststoffen“ DE-UZ 30a (RAL 2019b) verweisen in Bezug auf den Einsatz von Post-Consumer Recycling-Kunststoffen auf EuCertPlast als Verfahren zur Nachweisführung der Rezyklatherkunft. DE-UZ 30a gilt allerdings nur für Fertigerzeugnisse, die zu mehr als 90 Gew % aus Kunststoff bestehen sowie nicht für „Fertigerzeugnisse, die in den Geltungsbereich einer anderen produktspezifischen Vergabegrundlage des Blauen Engel fallen“ (ebd.). Hierdurch sind energieverbrauchsrelevante Produkte faktisch von einer Auszeichnung mit diesem Umweltzeichen ausgeschlossen. Übliche Produkte mit dem Blauen Engel nach DE-UZ 30a sind Tragetaschen, Stehsammler und Büroablagen oder Spielplatzgeräte. Die Anforderung an den Nachweis nach EuCertPlast (siehe 3.2) lautet (ebd.):

„Die Herkunft und die Zusammensetzung eingesetzter Kunststoffrezyklate sind durch den Antragsteller mittels eines Zertifikates (einschließlich Bericht) nach dem EuCertPlast Zertifizierungsschema (mit berechnetem und plausibilisiertem Nachweis des Post Consumer Anteils) nachzuweisen.

Weiterhin benennt der Antragsteller die qualitative und quantitative Zusammensetzung des beantragten Produkts, d.h. die Anteile von Kunststoffrezyklaten, Neuware und eventuell verwendeter Zusatzstoffe (Additive).“

Der Blaue Engel für Schreibgeräte nach DE-UZ 200 (RAL 2020a) ist aktuell das einzige Umweltzeichen, das Mindest-Anforderungen an den Kunststoff-Rezyklatgehalt von

¹ Mitglieder im LAGA sind neben dem Bundesumweltministerium die obersten Abfallwirtschaftsbehörden der Länder, d. h. meistens die für Umwelt zuständigen Länderministerien

² EPRO – European Association Of Plastics Recycling & Recovery Organisations, Plastics Recyclers Europe, EuPC – European Plastics Converters, recovinyl

zusammengesetzten Fertigerzeugnissen stellt. Auch hier erfolgt der Nachweis entsprechend des EuCertPlast-Zertifizierungsschemas. Die eingesetzten Kunststoffe müssen entweder zu mindestens 80 % aus PCR-Kunststoff oder aber zu mindestens 60 % aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen.

Bei diversen Produktgruppen ist der Einsatz von PCR-Kunststoffen bzw. die Deklaration des PCR-Anteils ein Vergabekriterium des Blauen Engels. Jedoch wird vielfach nicht explizit auf EuCertPlast verwiesen.

Im Beispiel des Umweltzeichens für „Drucker und Multifunktionsgeräte“ DE-UZ 205 (RAL 2020b) ist ein Mindest-PCR-Rezyklatgehalt von mehr als 5 % an der gesamten Masse der Kunststoffteile als Soll-Kriterium definiert. Darüber hinaus sind die PCR-Rezyklat-Anteile an der gesamten Masse der Kunststoffteile in entsprechenden Intervallen verbindlich auszuweisen. Allerdings ist im Nachweisverfahren eine Eigenerklärung der Hersteller zur Herkunft der Kunststoffrezyklate ausreichend.

In anderen Fällen dürfen bestimmte Materialkombinationen nur eingesetzt werden, wenn diese aus EuCertPlast-zertifizierten PCR-Kunststoffen bestehen. So gilt für Router nach DE-UZ 160 (RAL 2019a): „der Einsatz von Kunststoff-Verbünden aus PC und ABS [ist] zulässig, sofern diese aus Post-Consumer Rezyklaten bestehen.“ Die Nachweisführung hat bei Routern über EuCertPlast zu erfolgen.

3.4 DIN CERTCO

Vom DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. für die Vergabe der DIN-Zeichen gegründet, bietet DIN CERTCO die Zertifizierung von Produkten, Personen, Dienstleistungen sowie Unternehmen auf der Basis von DIN-Normen und ähnlichen Spezifikationen an.

In Bezug auf den Kunststoffrezyklateinsatz sind die DIN EN 15343:2007 und allgemein die DIN EN ISO 14021 (Kennzeichnung mit dem Drei-Pfeile-Symbol) die Grundlage. Das Zertifizierungsprogramm DIN CERTCO richtet sich an Anbieter von Produkten vor allem aus Kunststoff, aber auch anderen Materialien mit Rezyklatgehalt.

Für Elektro- und Elektronikgeräte spielt die Zertifizierung durch DIN CERTCO derzeit keine Rolle, da sich der zugrunde liegende Standard DIN:EN 15343:2007 nicht unmittelbar auf Endgeräte anwenden lässt.

3.5 UL ECVP 2809, Environmental Claim Validation Procedure (ECVP) for Recycled Content

UL Environmental Claim Validation Mark prüft den Post-Consumer-, Pre-Consumer- (Post-Industrial-), Closed-Loop- oder den Gesamtzyklatgehalt eines Produktes. UL ECVP 2809 ist nicht nur auf den Output eines Recyclers anwendbar, sondern auch auf Endprodukte oder Komponenten von Endprodukten. UL ECVP 2809 bezieht sich bei der Zertifizierung des PCR-Gehalts auf EN 15434:2007.

Differenziert wird nach

- ▶ Post-Consumer-Rezyklatanteil
- ▶ Pre-Consumer (post-industrial)-Rezyklatanteil
- ▶ Closed loop Rezyklatanteil (Material, das aus der gleichen bzw. einer vergleichbaren Anwendung zurückgeführt worden ist)

► Gesamter Rezyklatanteil

Aber auch UL ECVP 2809 findet bislang für Elektro- und Elektronikgeräte keine Anwendung, sehr wohl aber für viele andere Produktgruppen³.

3.6 RAL-GZ 720, % Recycling Kunststoff

RAL-GZ 720 (RAL 2018) definiert Güte- und Prüfbestimmungen für den Nachweis des Anteils an Kunststoffen, die aus Fraktionen der haushaltsnahen Getrennterfassung bzw. der haushaltsnahen Wertstoffsammlung gewonnen worden sind, in einem Kunststoff-Rezyklat, -Halbzeug, -Produkt oder Verpackung. Die Gütegrundlage beschreibt die lückenlose Rückverfolgbarkeit der Herkunft der Kunststoffe in den jeweiligen Stufen der Prozesskette. Das umschließt alle Prozessstufen von der Sortierung in LVP-Sortieranlagen über die Aufbereitung bis zum Einsatz der Rezyklate in Produkten (Becker 2020).

Da für Verpackungen weitestgehend andere Kunststoffe eingesetzt werden als für Elektro- und Elektronikgeräte, ist das RAL-Gütezeichen 720 nur sehr bedingt für die hier betrachteten Produkte relevant.

3.7 EPEAT-Kriterien und IEEE 1680 Standards

Das EPEAT-System für die umweltfreundliche Beschaffung von Elektronikgeräten setzt über eine Reihe von IEEE-, NSF- und UL-Standards Anforderungen an Produkte, die sich in verpflichtende und optionale Kriterien unterscheiden. Durch die Erfüllung optionaler Kriterien verbessert sich das Rating (Bronze-, Silber-, Gold-Level).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die EPEAT-Kriterien bezüglich der Kunststoff-Rezyklate für die drei Gerätekategorien Fernseher, bildgebende Geräte (Drucker, Kopierer, Multifunktionsgeräte etc.) und Computer und Displays.

³ Datenbank zertifizierter Produkte: <https://spot.ul.com/main-app/products/catalog/?keywords=>

Tabelle 1: EPEAT-Kriterien in Bezug auf den Kunststoff-Rezyklat-Einsatz (Zusammenstellung Fraunhofer IZM)

Art des Kriteriums	Fernseher Standard: IEEE 1680.3	Bildgebende Geräte Standard: IEEE 1680.2	Computer und Displays Standard: IEEE 1680.1
Verpflichtend	4.2.1.1 Deklaration des Gehalts an Post-Consumer Kunststoff (einschließlich enthaltener Füllstoffe / Additive), bezogen auf den Gesamt-Kunststoffgehalt des Produkts (ausgenommen: Leiterplatten, Kabel, Stecker u. a.)	4.2.1.1 Deklaration des Gehalts an Post-Consumer Kunststoff (einschließlich enthaltener Füllstoffe / Additive), bezogen auf den Gesamt-Kunststoffgehalt des Produkts (ausgenommen: Leiterplatten, Kabel, Stecker u. a.)	4.2.1.1 Mindestens 2 % Gehalt an Post-Consumer Kunststoff und/oder Post-Consumer Kunststoff aus IT-Geräten und/oder biobasiertem Kunststoff, bezogen auf den Gesamt-Kunststoffgehalt des Produkts (ausgenommen: Leiterplatten, Kabel, Stecker u. a.)
		4.2.1.2 Produkte mit mindestens 100 g Gesamtgewicht an Kunststoffen (ausgenommen: Leiterplatten, Kabel, Stecker u. a.) müssen mindestens 5 g Post-Consumer-Rezyklat enthalten.	
Optional	4.2.1.2 Mindestens 5 % Post-Consumer Rezyklat bezogen auf den Kunststoffgehalt (bei max. 5 kg Gesamt-Kunststoffgewicht) bzw. 10 % bei über 5 kg Gesamt-Kunststoffgewicht (1 Punkt)	4.2.1.3 Mindestens 5 % Post-Consumer Rezyklat bezogen auf den Kunststoffgehalt (bei max. 5 kg Gesamt-Kunststoffgewicht) bzw. 10 % bei über 5 kg Gesamt-Kunststoffgewicht (1 Punkt)	4.2.1.2 Höhere Gehalte an Post-Consumer Kunststoff und/oder Post-Consumer Kunststoff aus IT-Geräten und/oder biobasiertem Kunststoff, gestaffelt nach Produktgruppen (gestaffelt 1-2 Punkte, siehe nächste Tabelle)
	4.2.1.3 Mindestens 25 % Post-Consumer Rezyklat bezogen auf den Kunststoffgehalt (1 Punkt)	4.2.1.4 Mindestens 25 % Post-Consumer Rezyklat bezogen auf den Kunststoffgehalt (1 Punkt)	4.2.1.3 Mindestens 10 % Post-Consumer Kunststoff aus IT-Geräten bezogen auf entweder Gehäusekunststoffe oder auf den Gesamt-Kunststoffgehalt des Geräts (1 Punkt)

3.7.1 Fernseher

Bei den Fernsehern listet EPEAT nur noch sehr wenige aktive Geräte und diese auch nur für Anwendungen in Krankenhäusern. Keines der Geräte, einschließlich der archivierten Einträge, erfüllt eines der optionalen Kriterien (Stand: 16.6.2020).

3.7.2 Bildgebende Geräte

851 von 3159 als aktiv gelisteten Geräten halten mindestens das 5 % bzw. 10 %-Kriterium ein, 150 Geräte auch das 25 %-Kriterium⁴. Der deklarierte Gehalt an Post-Consumer Kunststoffen über alle derzeit EPEAT-gelisteten Geräte beträgt 4,8 % – im Vergleich zu einem Durchschnittswert von 1,4 % für archivierte EPEAT-gelistete Produkte, für die es hierzu Angaben gibt. Geräte, die mindestens das 5 % bzw. 10 %-Kriterium erfüllen, stammen von HP, Konica Minolta, Lexmark, Brother, Canon, Toshiba und Sharp (Stand 16.6.2020).

3.7.3 Computer und Displays

Bei Computern und Displays ist der PCR-Gehalt teilweise ein gemeinsames Kriterium mit der Verwendung biobasierter Kunststoffe. Zudem sind die optionalen Anforderungen an einen erhöhten Gehalt gestaffelt nach Gerätetyp (Tabelle 2).

Tabelle 2: Computer und Displays - EPEAT-Kriterium 4.2.1.2

Produkttyp	Minimaler Anteil für einen optionalen Punkt	Minimaler Anteil für zwei optionale Punkte
Desktop Computer, Workstation, Thin-Client, tragbare All-in-One Computer, kleine Server	10	35
Integrierte Desktop Computer	15	40
Notebooks	5	10
Tablets	3	5
Monitor	15	50

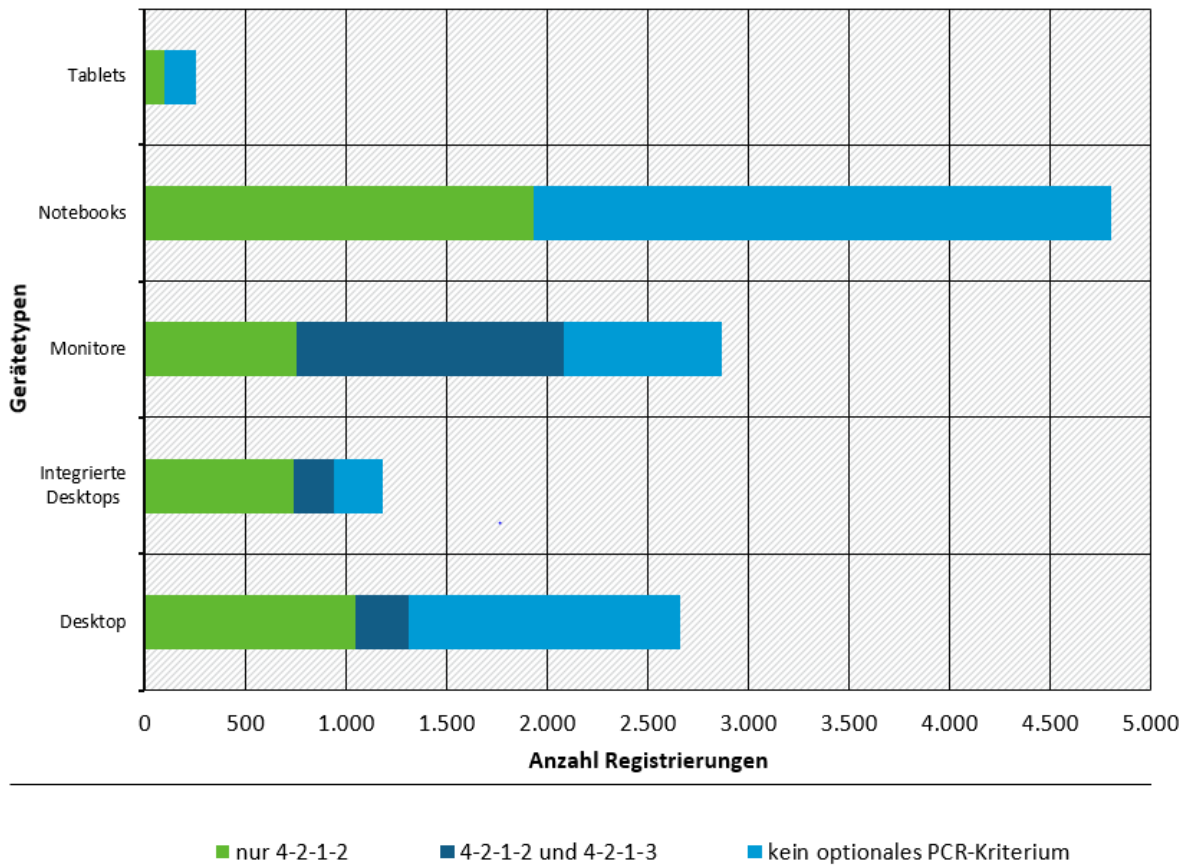
Die optionalen Kriterien zu PCRs (und ggf. biobasierten Kunststoffen) werden von einem erheblichen Anteil der gelisteten Geräte erfüllt. Das Kriterium 10 % Post-Consumer Kunststoffe aus IT-Geräten wird auffallend häufig von Monitoren erfüllt, bei Notebooks und Tablets wird es praktisch gar nicht erfüllt. Bei Notebooks und Tablets sind – bei geringeren Anforderungen an den erhöhten PCR-Gehalt nach Kriterium 4.2.1.2 – auch weniger Produkte vertreten, die überhaupt ein optionales PCR-Kriterium erfüllen (Abbildung 1).

⁴ Die Registrierung des gleichen Geräts in unterschiedlichen Ländern zählt hier als unterschiedliche Geräte

Abbildung 1: Anteil EPEAT-gelisteter Produkte, die optionale PCR-Kriterien erfüllen

Anteil EPEAT-gelisteter Produkte, die optionale PCR-Kriterien erfüllen

Stand 17.06.2020



Quelle: Eigene Darstellung nach Green Electronics Council (2020)

3.7.4 Überprüfung der Einhaltung der EPEAT-Kriterien

Die Hersteller erklären die Konformität mit den PCR-Kriterien auf der Grundlage einer Bestätigung durch die jeweiligen Materiallieferanten und einer vorzuhaltenden Berechnung des PCR-Anteils.

Zur regelmäßigen Kontrolle solcher Angaben werden diese unabhängig und ohne Vorwarnung der Hersteller geprüft (Green Electronics Council 2019): Die Untersuchungen werden von Auditoren, die für eine vom Green Electronics Council (GEC) genehmigte Konformitätssicherungsstelle arbeiten, durchgeführt. Für die stichprobenartigen Untersuchungen gibt es mehrere Stufen:

Stufe 0: Eine Prüferin oder ein Prüfer bewertet die Konformität mit einem Kriterium, indem sie oder er nur öffentlich verfügbare Informationen prüft. Es werden keine Produkte zur Inspektion oder Prüfung erhalten, und der Hersteller wird nicht aufgefordert, Unterlagen einzureichen. Wenn die öffentlich verfügbaren Informationen nicht schlüssig sind (d. h. nicht verfügbar waren, nicht aus öffentlichen Quellen gefunden werden konnten oder nicht genügend Details zur Feststellung der Konformität lieferten), kann die Prüferin oder der Prüfer angewiesen werden, eine Untersuchung der Stufe 1 durchzuführen.

Stufe 1: Eine Prüferin oder ein Prüfer bewertet die Konformität mit einem Kriterium, indem sie oder er die von einem Hersteller übermittelten Informationen prüft. Der Hersteller ist verpflichtet, detaillierte und genaue Informationen rechtzeitig bereitzustellen.

Bei weitergehenden Stufen erfolgt die Prüfung am Produkt, was jedoch im Falle des PCR-Gehalts irrelevant sein dürfte.

Hersteller müssen Nichtkonformitäten korrigieren, indem sie entweder

- ▶ Konformität herstellen,
- ▶ das Kriterium nicht deklarieren, bis die Konformität erreicht ist, oder
- ▶ indem sie das Produkt aus dem EPEAT-Register entfernen.

Der Green Electronics Council verlangt außerdem, dass Hersteller andere registrierte Produkte prüfen, um festzustellen, ob ihre Erklärungen ebenfalls korrigiert werden sollten. Wenn ein Hersteller die Nichtkonformität korrigiert, indem er das Kriterium nicht deklariert und das Kriterium ein optionales Kriterium ist, verliert er diesen Punkt. Wenn dies ein erforderliches Kriterium ist, muss das Produkt archiviert werden.

3.8 DIN EN 45557:2020 Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten

Die DIN EN 45557:2020 ist ein generischer Standard zur Berechnung des Anteils an recyceltem Material in Endgeräten und richtet sich an diejenigen, die produktgruppenspezifische Standards entwickeln, nicht die Hersteller unmittelbar.

Die deutsche Ausgabe der Norm ist im August 2020 veröffentlicht worden. Nachfolgende Zusammenfassung beruht noch auf der englischsprachigen Fassung der Europäischen Norm.

DIN EN 45557 berücksichtigt sowohl Pre-Consumer- als auch Post-Consumer-Rezyklate und grundsätzlich alle Arten von Materialien.

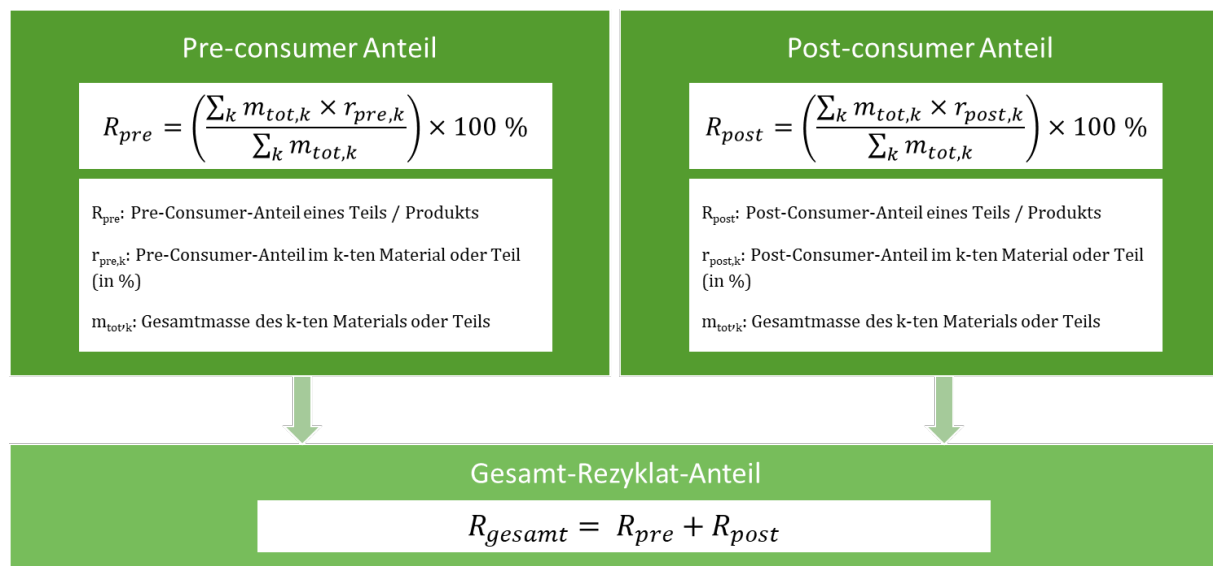
Der Standard stellt fest, dass ein Nachweis des Rezyklatgehalts am konkreten Produkt (derzeit) nicht machbar ist. Der Nachweis hat daher ausschließlich über eine Dokumentation und üblicherweise Massenbilanzen zu erfolgen. Die Massenbilanzen für einzelne Teile oder ein ganzes energieverbrauchsrelevantes Produkt sind über einen festzulegenden Abrechnungszeitraum zu berechnen:

$$\text{Output} = \text{Input} - \text{Lagerdifferenzen} - \text{interne Umwandlungen} - \text{Abfall}$$

Neben der Massenbilanz sind alternativ auch Identitätserhalt (identity preservation) einzelner Chargen und physikalische Getrennthaltung (physical segregation) von Recyclingmaterialien bis in die finale Komponente im Standard als Optionen für eine Rückverfolgbarkeit aufgeführt (Annex A).

Der Rezyklatanteil bezogen auf das einzelne Teil oder Endgerät ist getrennt für Pre-Consumer-Anteile und Post-Consumer-Anteile zu berechnen (Abbildung 2).

Abbildung 2: Berechnung des Rezyklatanteils nach DIN EN 45557



Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IZM) nach DIN EN 45557

Es darf ein Gesamt-Rezyklat-Anteil angegeben werden, dann sind aber auch die Einzelwerte für Pre- und Post-Consumer-Anteile zwingend mit anzugeben.

Tabelle 3: Pre- und Post-Consumer-Kunststoffe nach DIN EN 45557 (Zusammenstellung Fraunhofer IZM)

Pre-Consumer Kunststoffe	Post-Consumer Kunststoffe
<p>Quellen: Prozessabfälle</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ die mechanisches oder chemisches Recycling durchlaufen ▶ mit Ausnahme der Rückführung (insbesondere nach Aufmahlen) in den gleichen Prozess bzw. für die gleiche Art von Produkt, auch an unterschiedlichen Standorten 	<p>Quellen:</p> <p>Kunststoff-Flakes oder -Granulat aus dem mechanischen oder chemischen Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ aus der Behandlung defekter Produkte und unverkäuflicher Lagerbestände an Produkten ▶ aus der Behandlung von in Verkehr gebrachten Produkten <p>Zum Anteil der Post-Consumer Kunststoffe zählen auch die Füllstoffe, die in den betreffenden Kunststoffen enthalten sind und bereits in den Kunststoffen aus defekten / unverkäuflichen / in Verkehr gebrachten Produkten enthalten waren</p>

In Bezug auf Kunststoffe ist die Unterscheidung von Pre-Consumer- und Post-Consumer-Kunststoffen näher spezifiziert und in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Als man mit der Entwicklung der DIN EN 45557 begann, habe die Hoffnung bestanden, ein geeignetes technisches Nachweisverfahren implementieren zu können. Das habe sich aber als nicht machbar herausgestellt (Dworak 2020).

3.9 Zwischenfazit

Es sind eine Reihe von Nachweis- und Berechnungsverfahren im Bereich des PCR-Gehalts von Kunststoffen eingeführt und etabliert, jedoch beziehen sich diese entweder auf Produkte die

ganz überwiegend aus Kunststoff bestehen oder betreffen die Ebene der Kunststoffgranulate, und nicht die nachfolgenden Schritte bis in komplexe Elektro- und Elektronikgeräte.

Dennoch gibt es Umweltzeichen, die den PCR-Gehalt adressieren. Allerdings ist hier lediglich ein Nachweis durch den Hersteller, bzw. eine schriftliche Bestätigung durch den Zulieferer von Kunststoffen oder Teilen erforderlich – auch wenn für den ursprünglichen Recyclingprozess auf EU CertPlast o. ä. verwiesen wird. Die grundsätzliche Berechnung des PCR-Gehalts auch für komplexere Produkte ist mit der DIN EN 45557:2020 geregelt.

4 Ist-Stand des Einsatzes von PCR-Kunststoffen: Anforderungen, Verfügbarkeit und Produktbeispiele

Nachfolgend werden grundlegende material- und schadstoffbezogene Anforderungen und Herausforderungen in Bezug auf den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in energieverbrauchsrelevanten Geräten sowie verfügbare Informationen zur Art und Menge der derzeit verfügbaren PCR-Kunststoffe dargestellt. Vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung des Einsatzes von PCR-Kunststoffen durch verschiedene Hersteller anhand von konkreten Produktbeispielen erläutert.

4.1 Materialanforderungen

Zu den relevanten Materialanforderungen für in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzte Kunststoffe zählen, weitestgehend unabhängig davon, ob es sich um Primärkunststoffe oder Rezyklate handelt:

- ▶ Ästhetische Anforderungen, z. B. Farbe, Glanz und Vergilbungsindex
- ▶ UV Stabilität
- ▶ Geruch
- ▶ Haftfestigkeit (z. B. für 2K Prozesse)
- ▶ Recycled Content, gemäß EN 15343 (angegeben als % und PCR oder PIR Gehalt)
- ▶ RoHS, REACH und POP-konform⁵
- ▶ Physische Anforderungen, z. B. Dichte
- ▶ Rheologische Anforderungen, z. B. Schmelzvolumenrate bzw. Schmelzflussrate
- ▶ Mechanische Anforderungen, z. B. Zugmodul und Festigkeit, Zugdehnung usw.
- ▶ Thermische Anforderungen, z. B. Vicat-Erweichungstemperatur oder Schmelztemperatur
- ▶ Flammresistenz, gemäß UL 94 oder ASTM D 3874
- ▶ Reinheit und chemische Eigenschaften, z. B. Füllstoffgehalt, Bromgehalt, Verunreinigungen.

Für einzelne Polymere bilden eigene Standards die Grundlage, wie die Spezifikation – unter Berücksichtigung der meisten aber nicht aller oben genannten Charakteristika – zu dokumentieren ist:

- ▶ PP: ISO 19069
- ▶ ABS: ISO 19062, ISO 2580
- ▶ Schlagzähes PS: ISO 19063
- ▶ PC: ISO 7391

Bei der Substitution von Primärkunststoffen durch Rezyklate unterliegt die Abweichung der Materialeigenschaften der Rezyklate, z. B. hinsichtlich Verarbeitbarkeit oder der mechanischen

⁵ Nachweis erfolgt üblicherweise entsprechend DIN EN 62321-1 bis -9; VDE 4200

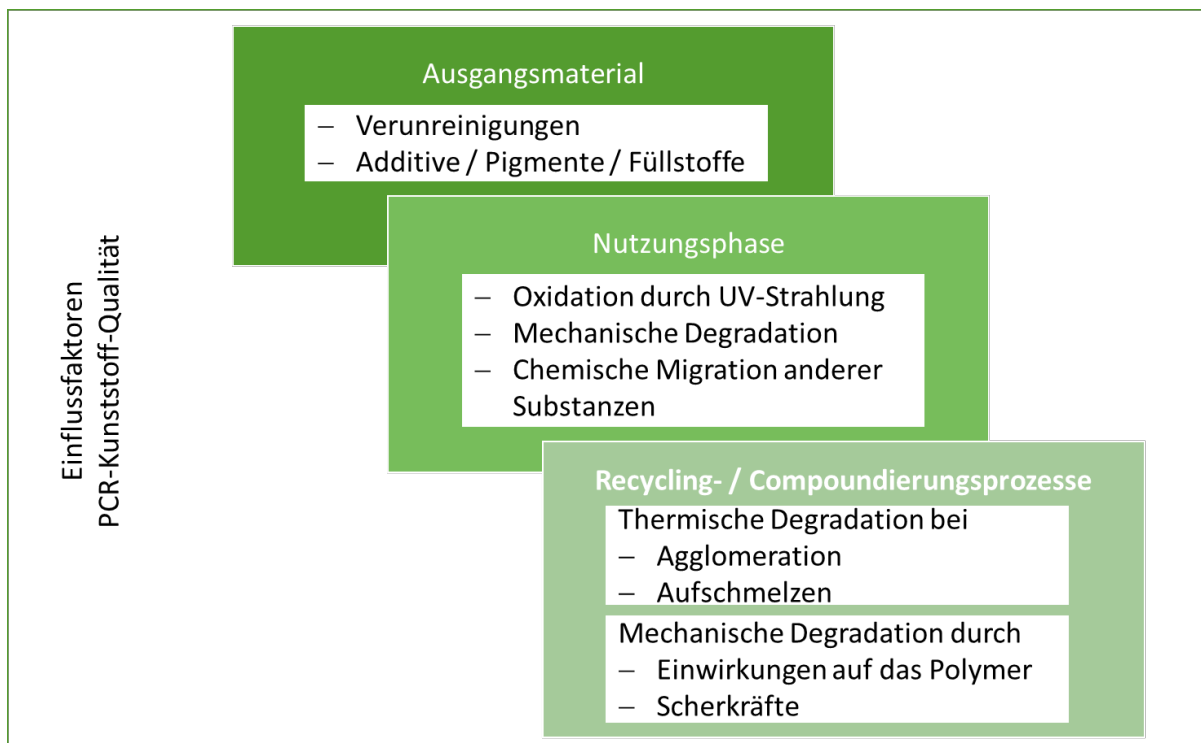
Eigenschaften, einer geringen Toleranz, da das Produktdesign sowie die Produktionsanlagen und Herstellungsprozesse vorgegebene Randbedingungen sind. Teilweise kann Änderungen der Materialeigenschaften begegnet werden: Beispielsweise kann eine verringerte Schlagzähigkeit eine Verstärkung durch Verdickung oder zusätzlicher Versteifung in der Konstruktionsplanung des Bauteils erfordern.

Grundsätzlich haben bei PCR-Kunststoffen deutlich mehr Faktoren einen Einfluss auf die Materialeigenschaften als das bei Primärkunststoff der Fall ist (Abbildung 3). Insbesondere ist das Ausgangsmaterial mit Verunreinigungen – z. B. Anhaftungen und Fremdmaterialien – in schwankendem Ausmaß belastet, ebenso ändert sich die Zusammensetzung des zu recycelnden Kunststoffs hinsichtlich Additiven und Füllstoffen.

Bereits zuvor war das Polymermaterial unterschiedlichen Umweltbedingungen in der ersten Nutzung unterworfen, insbesondere durch UV-Strahlung und mechanische Belastung, aber auch durch den Kontakt mit verschiedenen Substanzen. Schlussendlich wirken auch die Recycling- und Compoundierungsprozesse auf das Material ein: Unterschiedliche Aufbereitungsprozesse bei unterschiedlichen Recyclern resultieren in Unterschieden bei der erzeugten Rezyklatqualität.

Anhand dieser Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Materialqualität und -eigenschaften wird deutlich, dass recycelter Kunststoff kaum die gleichen Eigenschaften wie Primärkunststoff aufweisen kann und auch, dass die Einflussfaktoren wie Veränderungen aufgrund vorheriger Nutzung, aber auch der Prozessbedingungen bei verschiedenen Recyclern zu schwankenden Produktqualitäten führen können (Abbildung 3).

Abbildung 3: Einflussfaktoren auf die Qualität von PCR-Kunststoffen



Quelle: in Anlehnung an (Partners for Innovation 2015)

Es kann auch vorkommen, dass sich die Materialeigenschaften unerwartet im Laufe der Zeit ändern: So haben Tests bei Philips für ein PCR-ABS ergeben, dass dessen Schlagzähigkeit nach

Temperaturlagerung unerwartet und nicht ohne weiteres erklärbar nach mehreren Wochen deutlich abnahm (Setayesh 2019).

Eine Standardisierung von PCR-Kunststoff-Qualitäten kann unterstützend wirken, um mehr Sicherheit im Markt zu schaffen hinsichtlich der Eigenschaften der Rezyklate und um eine gemeinsame Gesprächsbasis zwischen Recyclern und potenziellen Anwenderinnen und Anwendern des Kunststoffs zu etablieren (Vincenti et al. 2018; Wagner et al. 2020). Ein solches Standardisierungsverfahren ist mit der DIN SPEC 91446 „Standards für den (internetbasierten) Handel mit und Verarbeitung von Kunststoffabfällen und Rezyklaten“ im September 2020 initiiert worden (Hein 2020) und verfolgt den Zweck, „verlässliche und nachprüfbar Standards [zu] setzen u.a. für

- a) die eindeutige Einstufung von Kunststoffabfällen nach Stoffstrom und Grad der Zirkularität (post-consumer, post-industrial/pre-consumer, post-commercial etc.);
- b) für (Mindest-)Qualitäten je nach Anwendungsfall des Rezyklats („Qualitätsbänder“), sofern erforderlich und möglich;
- c) für die Kennzeichnung von Rezyklatanteil und -art in Regranulaten und Compounds;
- d) für die Prozesse der Handhabung von Kunststoffabfällen und Rezyklaten (Erfassung, Beprobung, Verarbeitung usw.).“ (DIN SPEC 91446)

Da bislang insbesondere Unternehmen aus dem Verpackungsbereich an dieser SPEC arbeiten, ist noch nicht absehbar, inwieweit die Spezifika des PCR-Einsatzes in Elektro- und Elektronikgeräten Berücksichtigung finden werden.

Auch auf europäischer Ebene wird derzeit im Rahmen der Circular Plastics Alliance (Europäische Kommission o.J.) an der Definition und Standardisierung von Rezyklatqualitäten gearbeitet.

4.2 Schadstoffanforderungen

Da im Recycling naturgemäß mit sehr heterogenem Material gearbeitet wird, das aus dem Markt zurückkommt, spielen Schadstoffe eine besondere Rolle: Substanzen, die mittlerweile streng reglementiert sind, sind im Abfallstrom noch lange Zeit enthalten. Während es im Falle von Primärmaterial vergleichsweise einfach ist, reglementierte Substanzen nicht zu verwenden, liegt die Aufgabe für den Recycler darin, bereits enthaltene Schadstoffe abzutrennen. Da kein Trennverfahren mit einer Trennschärfe von 100 % arbeitet, werden zwangsläufig auch ungewünschte Substanzen in den Rezyklatstrom eingetragen:

DecaBDE ist ein häufig verwendetes Flammschutzmittel, das in Elektro- und Elektronikgeräten enthalten ist, z. B. in Fernseher-, Computer- und Laptop-Gehäusen, in Kabeln und Steckern (Morf et al. 2005; Bundesamt für Umwelt 2017). Die POP Verordnung reguliert DecaBDE und andere bromierte Flammschutzmittel. Bezüglich Anforderungen an die Abfallwirtschaft gilt ein Grenzwert von 1000 mg/kg für die Summe der Konzentrationen von Tetrabromdiphenylether, Pentabromdiphenylether, Hexabromdiphenylether, Heptabromdiphenylether und Decabromdiphenylether. Die Kommission überprüft diesen Konzentrationsgrenzwert spätestens bis zum 16. Juli 2021 und legt erforderlichenfalls einen Gesetzgebungsvorschlag zur Senkung dieses Grenzwerts auf 500 mg/kg vor.

Elektro- und Elektronikgeräte sind von den verschärften Grenzwerten der POP-Verordnung (EU) 2019/1021 ausgenommen, mit Verweis auf die RoHS-Richtlinie 2011/65/EG – und den dort geltenden Grenzwerten.

Aufgrund der Einstufung von Titandioxid als „Stoff mit Verdacht auf krebserzeugende Wirkung beim Einatmen“ durch die Europäische Kommission im Oktober 2019, sind Abfälle, die mehr als 1 % Titandioxid in Pulverform oder Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ enthalten, zukünftig unter Umständen als „gefährliche Abfälle“ zu klassifizieren. Dies betrifft Abfallarten, für die in der Anlage der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) gefährliche und nicht-gefährliche Spiegeleinträge bestehen. Absolut nichtgefährliche Abfallarten sind von der Einstufung nicht betroffen. Gefährliche Abfälle können nur solchen Recyclinganlagen zugeführt werden, die über eine entsprechende Genehmigung zur Verwertung gefährlicher Abfälle verfügt.

Bei nachfolgenden Verarbeitungsschritten, wie der Compoundierung kommt es durch den Zusatz von Additiven und Primärkunststoffen zu einem Verdünnungseffekt, so dass Schadstoffgrenzwerte im Kunststoffgranulat eher eingehalten werden als noch bei den Flakes unmittelbar aus dem Recycling.

Anforderungen gemäß REACH und RoHS können aktuell in der Regel eingehalten werden, jedoch stellen einige Hersteller an die Schadstofffreiheit höhere Anforderungen (striktere Grenzwerte). Diese seien jedoch nach Aussage von Recyclern kaum zu erfüllen, da sich die gängigen Separationsprozesse an den Stoffanforderungen von REACH und RoHS ausrichten würden und zudem die Analysemethoden für geringere Grenzwerte fehlten.

Seitens der Recycler wird der dynamische Wandel der Regulation von Schadstoffgehalten perspektivisch als wesentliches Hemmnis für den Ausbau der Recyclingkapazitäten benannt: Angesichts der Möglichkeit, dass künftige Stoffrestriktionen oder Grenzwerte, die nicht praktikabel nachgewiesen werden können, ein grundsätzliches Risiko für den Absatz der Rezyklate darstellen, wird nur sehr zurückhaltend in neue Recyclingkapazitäten investiert. Ein stabiles rechtliches Umfeld kann hier für Planungssicherheit sorgen.

Auch kommt es zur Einführung von für das Recycling problematischen Substituten, wie das Beispiel phosphorbasierter Flammhemmer als Ersatz für bromierte Flammhemmer zeigt: Kunststoffe mit phosphorbasierten Flammhemmern können in großen Mengenströmen nicht adäquat detektiert werden und überlappen sich zudem in ihrer Dichte mit nicht-flammgehemmten Kunststoffen, so dass erstere in der üblichen Schwimmsinktrennung nur teilweise abgetrennt werden (Tange et al. 2013). Darüber hinaus können sie insbesondere bei der Extrusion zu kritischen Emissionen führen.

4.3 Materialverfügbarkeit

Nach Angaben von EERA bzw. MGG Polymers entfallen 6,2 % der Gesamtnachfrage nach Kunststoffen in Europa oder 3,1 Mio. Tonnen auf den Sektor der Elektronikproduktion. Die offiziell gesammelten und wiederverwerteten Mengen an Elektro- und Elektronikaltgeräte-Kunststoffen machen etwa 700.000 Tonnen aus. Es ist jedoch auch davon auszugehen, dass ein großer Anteil der inoffiziell anfallenden Elektro- und Elektronikaltgeräte in der EU wiederverwertet wird. MGG Polymers nimmt an, dass die Gesamtmenge an verwerteten Elektro- und Elektronikaltgeräte-Kunststoffen in der EU etwa 1,4 Mio. Tonnen beträgt (MGG Polymers 2020), teils aus offiziell gesammelten Elektroaltgeräten, teils aber auch aus anderweitig verwerteten Elektroaltgeräten. Unter diesen Annahmen lässt sich ableiten, dass knapp die Hälfte der 3,1 Mio. Tonnen in neuen in der EU auf den Markt gebrachten Elektro- und Elektronikgeräten verwendeten Kunststoffmenge zu verwertbarem Material am Ende der Lebensdauer wird – Veränderungen in der Produktzusammensetzung und den zeitlichen Verzug zwischen Inverkehrbringen und dem Aufkommen als Elektroaltgerät außer Acht gelassen. Die Kapazitäten der großen Kunststoff-Recycler im Bereich EAG (Tabelle 4) entsprechen jedoch bei

weitem nicht den erwarteten 1,4 Mio. Tonnen. Ein erheblicher Anteil wird demnach durch kleinere Unternehmen und / oder im Einzelnen auf nicht nachvollziehbaren Wegen verwertet.

Der Kunststoffgehalt der Hauptgerätekategorien und die Aufschlüsselung des Gewichts ausgewählter Geräte-Kategorien sind in Tabelle 4 aufgeführt: Elektrokleingeräte bestehen zu durchschnittlich 28% aus Kunststoffen. Demgegenüber beträgt der Kunststoffanteil bei Elektro-Großgeräten zum Beispiel nur 15%. Letztere stellen jedoch mit 54% mehr als die Hälfte des Gewichts aller verwerteten Geräte der Kategorien Elektrokleingeräte, Elektro-Großgeräte, Bildschirme und Kühlgeräte dar.

Tabelle 4: Kunststoffanteile ausgewählter Geräte-Kategorien (Quelle: EERA / MGG Polymers)

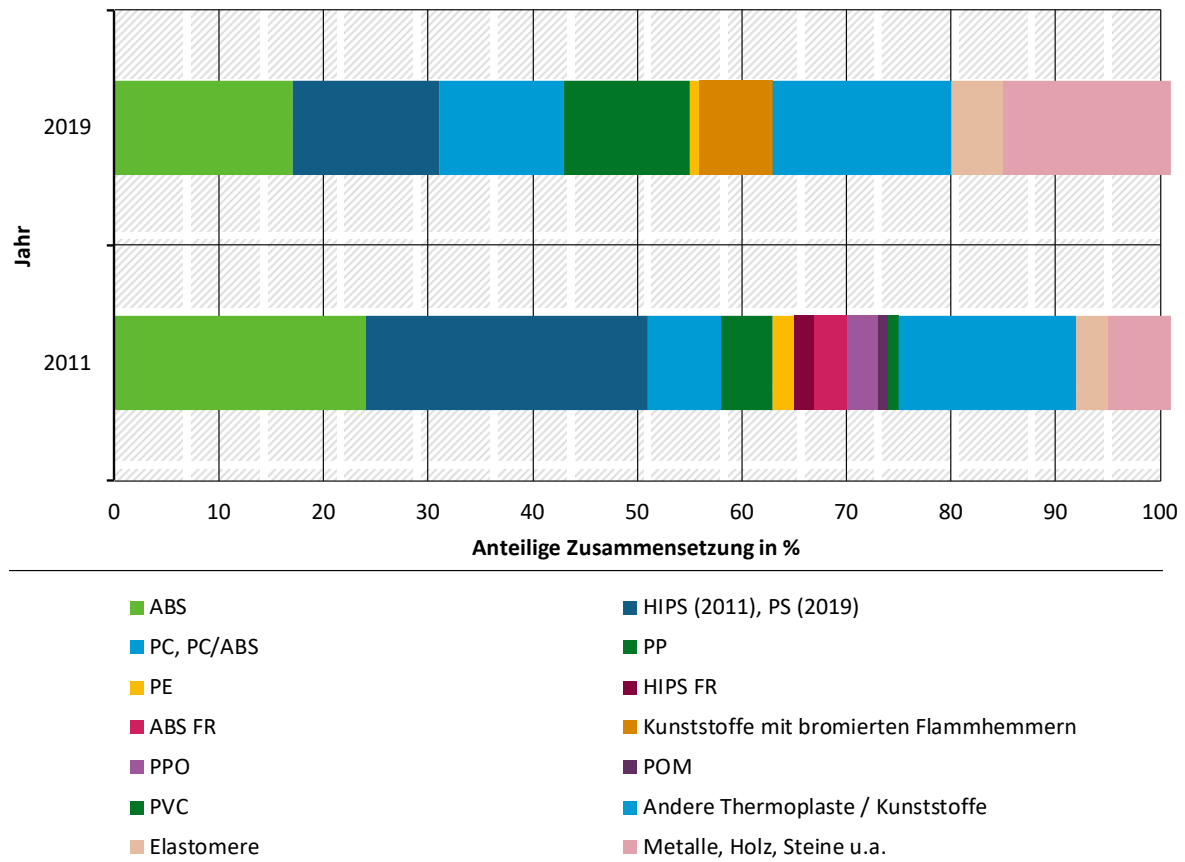
Kategorie	Durchschnittlicher Kunststoffanteil je Gerätekategorie [Gew-%]	Anteil der Gerätekategorie an der Gesamtmenge aller Geräte [Gew-%]
Elektrokleingeräte	28 %	27 %
Elektro-Großgeräte	15 %	54 %
Bildschirme (mix)	22 %	8 %
Kühlgeräte	17 %	11 %

Die Zusammensetzung des Wareneingangs an Elektroaltgeräten des Recyclers MGG Polymers hat sich in den letzten Jahren deutlich verändert. Der Vergleich der Jahre 2011 und 2019 (Abbildung 4) zeigt einen Rückgang des PS-Anteils bei gleichzeitigem Anstieg des Anteils an PC und PC/ABS und PP innerhalb des WEEE-Kunststoffmaterials (Slijkhuis 2020).

Abbildung 4: Veränderung des Wareneingangs des EAG-Recyclers MGG Polymers, 2011-2019

Veränderung des Wareneingangs des EAG-Recyclers MGG Polymers

Aufteilung nach Kunststoffsorten



Quelle: Eigene Darstellung nach MGG Polymers, 2020

Dies ist zu einem großen Teil auf den Mengenrückgang von CRT-Fernsehern, Monitoren und Tisch-PCs sowie einem Anstieg an Flachbildschirmgeräten in Kombination mit Modems und Set-top-Boxen zurückzuführen (MGG Polymers 2020).

Die größten spezialisierten europäischen Recyclinganlagen für Kunststoffe aus Elektroaltgeräten sind in Tabelle 5 aufgeführt. Einige verarbeiten auch Schredderrückstände aus dem Bereich Altautos – und nicht alle recycelten Kunststoffe finden wieder Verwendung im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte. Grundsätzlich können diese Recycler als Quellen für PCR-Kunststoffe für neue Elektro- und Elektronikgeräte dienen.

Zwei größere Kunststoffrecycling-Anlagen befinden sich in Deutschland, weitere in Österreich, den Niederlanden und Großbritannien.

Dazu kommen noch mehrere größere Recycler, die geschredderte Kunststoffe aus EAG zur Weiterverarbeitung anbieten, so zum Beispiel STENA PS und ABS.

Tabelle 5: Recycling-Unternehmen für EAG- und ELV-Kunststoffe in Europa (Auswahl)

Firma	Standort	Verarbeitete Abfallfraktionen	Rezyklate	Menge
bage plastics GmbH	Wolfers, Österreich	Kühlgeräte	Kunststoffregranulate und Compounds aus PS, ABS, PP, PC-ABS (Bage Plastics o.J.)	ca. 30.000 t/a ⁶
bage plastics GmbH	Großschirma, Deutschland	Elektrokleingeräte	Kunststoffgranulate aus PS, ABS und PP (Bage Plastics o.J.a)	20.000 t/a
Coolrec Plastics bv	Waalwijk, Niederlande	Haushaltsgeräte und andere EAG	PP/PE, PS und ABS	50.000 t/a
MBA Polymers UK Ltd	Großbritannien	ELV- und andere Schredderrückstände	ABS, HDPE, PP, PS (MBA Polymers o.J.)	ca. 40.000 t/a
MBA Polymers Germany GmbH	Mauna, Deutschland	diverse	ABS, HIPS, PS, PP und PC/ABS (MBA Polymers o.J.b)	ca. 8.000 t/a
MGG Polymers GmbH	Kematen, Österreich	diverse	PP, PS, PC/ABS (EuCertPlast 2020)	ca. 25.000 t/a
AO Recycling	Telford, Großbritannien	Kühlgeräte	PS, ABS (Recycling Magazine 2020)	20.000 t/a
Axion Recycling	Salford, Großbritannien	ELV-Schredder-Fraktion	ABS, PP	n.a.
Galloo Plastics	Halluin – Frankreich	EAG, Altfahrzeuge, Haushaltsabfälle	Kunststoffregranulate und Compounds aus PP, PE, PS, ABS	ca. 90.000 t/a

Die noch 2016 in der UBA-Studie „Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe“ (Wilts et al. 2016) getroffene Aussage, „eine werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen aus Elektroaltgeräten erfolgt derzeit noch nicht in nennenswerter Größenordnung“ gilt so nicht mehr.

4.4 Anwendungsbeispiele

Etwa 60.000 - 100.000 t Post-Consumer-Rezyklat-Kunststoffe werden in der Europäischen Union für neue Elektro- und Elektronikgeräte pro Jahr eingesetzt (PlasticsEurope 2019).

Mehrere Hersteller verwenden bereits seit längerem post-industrielle (PIR) und PCR-Kunststoffrezyklate.

1995 brachte Hewlett-Packard Drucker auf den Markt mit einem 25 % Rezyklatanteil im Kunststoffgehäuse, teils aus Post-Consumer Kunststoffen (insbesondere Telefone), teils aus post-industriellen Quellen (Ross und Choong 1996).

Lenovo setzt seit 2005 PIR-Kunststoffrezyklate für IT-Geräte ein, seit 2007 auch PCR-Kunststoffe. Abhängig von den endgültigen Anwendungsanforderungen liegt der PCR-Anteil im

⁶ 60 Millionen Kühlgeräte im Jahr laut bage plastics, Annahme: 5 kg verwertbarer Kunststoff pro Gerät

Kunststoffverbundmaterial zwischen 10 und 85 Gew.-%. Anhand der Entwicklung bei Lenovo lässt sich nachvollziehen, wie die schrittweise Ausweitung des Rezyklateinsatzes bei einem großen IKT-Hersteller erfolgen kann (Tabelle 6). Es ist eine gewisse Stagnation zwischen 2010 und 2017 festzustellen, die sich auch in einem etwa gleichbleibenden mengenmäßigen Einsatz an PCR-Kunststoffen zeigt. Erst in den letzten Jahren stieg der Gesamteinsatz an PCR-Kunststoffen bei Lenovo wieder an und erreichte 2019 etwa 7.700 Tonnen (Eure 2020).

Eine Einführung von Rezyklaten mit post-industrial Kunststoffen zu beginnen, bietet sich aufgrund der eindeutiger definierten Vorgeschichte der Materialien an. Ungewöhnlich ist der eher späte Einsatz von PCR-Kunststoffen für Verpackungen, da sich Verpackungen für erste PCR-Erfahrungen mit minimalen Auswirkungen auf das eigentliche Produkt eignen.

Tabelle 6: Einführung von Kunststoff-Rezyklaten am Beispiel von Lenovo

Jahr	Meilenstein
2005/06	Einsatz von 25 % Rezyklatgehalt PIR-Kunststoffen (flammgehemmtes PC/ABS) für die Unterseite von Notebooks
2007	Verwendung von 30 % Rezyklatgehalt PCR-Kunststoffen (ABS/PET) aus recycelten PET-Flaschen für einen Monitor (ThinkVision L193P)
2009	Verwendung von 30 % Rezyklatgehalt PCR-Kunststoffen (flammgehemmtes PC/ABS) aus EAG (und 15 % Talkum) für Notebooks (ThinkPad), besondere Herausforderung: dünnwandig, hohe Steifigkeit Verwendung von ABS-Rezyklaten mit 65 % PCR- und 20 % PIR-Gehalt in dekorativen Monitorteilen (Quelle: EAG; keine Verwendung von primärem Granulat)
2010	Über die gesamte Produktpalette werden über 10 % recycelte Kunststoffe eingesetzt (PCR und PIR)
2017	Entwicklung von closed-loop PCR Kunststoffen für den Einsatz in 2 Produkten; Einführung von PCR- und PIR-Kunststoffen in Verpackungen
2018	Einsatz von closed-loop PCR-Kunststoffen aus IT-Geräten in 21 Produkten

Quelle: Lenovo o.J.

Während PCR-Kunststoffe in Lenovos PCs, Monitoren und Servern weite Verbreitung finden, stellt der Einsatz in Notebooks, Tablets und Smartphones noch eine technologische Herausforderung dar. In einzelnen All-in-One Computern beträgt der PCR-Gehalt über 40 % bezogen auf den Kunststoffgehalt und bei ausgewählten Displays über 50 %⁷.

Seit 2008 arbeitet Dell mit Kunststoffrezyklaten für seine Geräte, seit 2014 mit Rezyklaten aus EAG, insbesondere aus Geräten der eigenen Rücknahme. Der erste Einsatz von PCRs bei All-in-One-Computern erfolgte damals im Ständer und der Rückseite der Geräte. Der PCR-Gehalt eingesetzter Granulate wird von Dell mit 30-35 % angegeben (Dell o.J.).

Grundsätzlich ist die Rücknahme und das Recycling eigener Geräte eine gute Möglichkeit an Material definierter Zusammensetzung zu kommen. Dieser Ansatz wird nicht nur von Dell, sondern z. B. auch von Lexmark für Tonerkartuschen verfolgt (Jos Vlughter 2017). Ein solcher Closed-Loop-Ansatz ist jedoch nicht ohne weiteres auf andere Hersteller oder gar andere Produkte übertragbar, da dieser von der erfolgreichen Rücknahme der Produkte abhängt.

Apple verwendet in seinen Produkten vergleichsweise wenig Kunststoffe, erweitert aber seit einigen Jahren auch den Einsatz an Rezyklaten mit der Zielsetzung, eines Tages die eigenen

⁷ Nach EPEAT-Kriterien

Geräte vollständig aus recycelten oder biobasierten Materialien zu gestalten (Apple Inc. 2019). Die Vielfalt an Kunststoffen in Apples Produkten ist u. a. bedingt durch die jeweils unterschiedlichen technischen Anforderungen. Mit Stand 2018 hat Apple für 24 verschiedene Kunststoffsorten recycelte Alternativen identifiziert und so im Durchschnitt einen Rezyklatanteil von 38 % für insgesamt 82 Komponenten erreicht (Apple Inc. 2019).

Auch Samsung setzt Kunststoffrezyklate zum Beispiel in Fernsehern, Monitoren und Ladegeräten von Mobiltelefonen ein. Insgesamt wurden nach eigenen Angaben 2017 von Samsung insgesamt 35.000 Tonnen Post-Consumer Kunststoffe - teilweise aus Plastikflaschen - eingesetzt, was 6,1 % des gesamten Kunststoffeinsatzes von Samsung entspricht (Maile 2019). Ein konkretes Beispiel ist der Reiseadapter des Smartphones Galaxy S8, der 20 % recyceltes PC enthält (Samsung o.J.).

Vor 10 Jahren kam Electrolux mit einem Staubsauger⁸ auf den Markt, der mit einem Rezyklatanteil von 55 % hergestellt wurde.

Philips verfolgt seit einer Weile ambitionierte Ziele für den PCR-Einsatz (Setayesh 2019). Für mehrere Produkte – zwei Modelle von Dampfbügeleisen und ein Staubsauger-Modell – veröffentlicht Philips nicht nur den Gesamt-PCR-Gehalt, sondern auch welche Komponenten im Einzelnen PCR-Kunststoffe enthalten (Tabelle 7).

Kaffeemaschinen sind für Philips in besonderer Weise ein Produkt, um den Einsatz von PCR-Kunststoffen zu erproben und auszuweiten, trotz besonderer Herausforderungen, bedingt durch den Kontakt mit Lebensmitteln in einigen Teilen, Geruchsfreiheit des Materials und thermische Belastungen: In der Senseo Up Maschine von 2014 fand für die Bodenplatte ein aus 90 % PCR bestehendes ABS Verwendung. Zu dieser Zeit war der Einsatz von PCR-ABS nur für schwarze Teile möglich. Die Bodenplatte wurde mit einer matten Oberfläche gestaltet, auf der minimale Einschlüsse und Flussmarken vom Spritzgussverfahren weniger sichtbar sind und so die Limitierungen des Rezyklats besser kaschiert werden konnten. Des Weiteren wurde das Design um eine innere tragende Struktur aufgebaut, die aus verstärktem, recycelten PP gefertigt werden konnte, ohne Rücksicht auf das äußere Erscheinungsbild nehmen zu müssen (Philips 2014).

Schließlich wurde auch bei der meistverkauften Kaffeemaschine Senseo Original der Einsatz von Rezyklaten umgesetzt, mit der Maßgabe keine Teile ändern zu müssen. Auch hier wurde bei der – schwarzen – Bodenplatte Rezyklat eingesetzt, in diesem Falle PP. 30 % des Rezyklats stammt dabei aus alten Philips-Staubsaugern, in Summe wurde ein PCR Gehalt von 95 % für die PP-Bodenplatte erreicht (Philips o.J.).

In einem weiteren Modell (Senseo Viva Café Eco) wurden weitere Teile aus Rezyklat gefertigt: Die obere Abdeckung aus PC aus alten CDs und DVDs, die Deckelöffnung, die vorderseitige Abdeckung und die Bedienknöpfe aus ABS aus gemischten EAG, das Gehäuse aus PP von Verpackungsabfällen und die Schale zum Auffangen überlaufender Flüssigkeit aus PP von Philips-eigenen EAG (Feenstra, Onnekink 2020). Die obere Abdeckung weist zudem ein gewelltes Design auf, durch das mögliche Materialfehler weniger auffällig sind (Gort, Gerrits 2015).

⁸ Modellbezeichnung: Ultra Silencer Green

Tabelle 7: PCR-Kunststoffe in Philips-Produkten

Produktbeispiel	Teile mit PCR-Kunststoffen
<p>Dampfbügeleisen Die Kunststoffteile des Bügeleisens enthalten Rezyklate. Insgesamt sind bei 11 Komponenten Primär- durch Sekundärkunststoffe ersetzt worden. Der Rezyklatgehalt beträgt insgesamt 30 %.</p>	<p>Äußere Teile:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Einsatzteil - Recyceltes PC ▶ Einfüll-Verschluss - Recyceltes PC ▶ Gehäuse - Recyceltes PC ▶ Abdeckung – Recyceltes PBT ▶ Thermostat-Regelung - Recyceltes PBT ▶ Einsatz - Recyceltes PC ▶ Einsatz-Abdeckung - Recyceltes PC ▶ Rückseite - Recyceltes PC <p>Interne Komponenten:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Wassertank Unterseite - Recyceltes PP Homopolymer ▶ Durchleitungsplatte - Recyceltes PP Homopolymer ▶ Nockenträger - Recyceltes PC
<p>Dampfbügeleisen Etwa 50 % des Gewichts dieses Geräts besteht aus Kunststoff. Insgesamt 17 Teile enthalten recycelte Kunststoffe.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ vorderer Verschluss - Recyceltes PBT mit 48 % PCR ▶ Unterteil Tank - Recyceltes PP, 90 % Polyisocyanurat ▶ Unterseite Ständer - Recyceltes PP, 90 % Polyisocyanurat ▶ Gehäuse - Recyceltes PC mit 90 % PCR ▶ Einsatz - Recyceltes PP, 90 % Polyisocyanurat
<p>Staubsauger Recyceltes Polypropylen (PP) findet für die Kunststoffteile Verwendung. Der Rezyklatanteil beträgt 25-47 %.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ untere Rückseite ▶ Kabeldurchlass ▶ Rückseite ▶ Staubabdeckung ▶ untere Vorderseite

Quelle: Philips o.J.a

Am Beispiel eines neu zu entwickelnden Funksensors⁹ lassen sich die Randbedingungen für den Rezyklateinsatz wie in Tabelle 8 zusammenfassen.

Tabelle 8: Randbedingungen für den ABS-Einsatz

Kriterium	PCR ABS	PIR ABS
Farbe	Begrenzte Möglichkeiten, insbesondere bei kräftigen und leuchtenden Farben	Farbloses ABS verfügbar, beliebige Färbung bei der Compoundierung möglich
Verfügbarkeit	Schwarzes ABS ist verfügbar	Kaum in kleinen Mengen verfügbar
Preis	Vergleichbar Primär-ABS	Höher als Primär-ABS

Quelle: Feenstra, Onnekink 2020

⁹ Demonstrator „Wireless Value“ im Projekt PolyCE

Im Bereich der Weißen Ware ist insbesondere der Einsatz von PCR-PP relevant (Schnarr 2020).

Grundsätzlich ist es – abhängig vom Anwendungsfall und dem Polymer – technisch möglich einen erheblichen Anteil an Primärkunststoffen durch PCR-Kunststoffe zu ersetzen (Maisel et al. 2020). Als Ergebnis dieser zahlreichen Produktbeispiele aber insbesondere auch des Fachgesprächs vom 20.10.2020 lässt sich konstatieren, dass kein Nachfrageproblem nach PCR-Kunststoffen besteht. Wohl aber merken Recycler an, dass vor allem die Nachfrage nach günstigen PCR-Granulaten besteht und die Zahlungsbereitschaft in einem Missverhältnis zu den Materialkosten steht.

Für Massenprodukte stünden zum Teil noch nicht genug Rezyklatmengen zur Verfügung, hierdurch könne die Liefersicherheit nicht für jede Gerätecharge garantiert werden (Slijkhuis 2020a).

5 Design from Recycling: Hemmnisse, Grundsätze und Vorgehen

Eine Reihe von Hemmnissen sind bei der Einführung von PCR-Kunststoffen zu erwarten, derer man sich bewusst sein sollte. Eine Zusammenstellung ökonomischer, technischer und organisatorischer Hemmnisse aus Sicht eines Haushaltsgeräteherstellers ist in Tabelle 9 dargestellt (Schnarr 2020). Grundsätzlich treffen diese Hemmnisse aber auch auf Hersteller anderer Elektro- und Elektronikgeräte zu.

Tabelle 9: Hemmnisse für den Einsatz von PCR-Kunststoffen in Elektro- und Elektronikgeräten

Ökonomisch	Technisch	Organisatorisch
Langfristige Verfügbarkeit der Werkstoffe schwierig einschätzbar	Werkstoffqualitäten geringer als Neuware	Rezyklat hat kein gutes Image (insbes. PCR)
Lieferketten im Vergleich zu „virgin materials“ recht komplex und undurchsichtig	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ausgleich durch Mischung mit Neuware ▶ Einsatz von Füllstoffen und Batches ▶ Neukonstruktion ▶ Rückfalllösungen mit Primärware sind unausweichlich 	Einsatz von Rezyklat erhöht die Variantenvielfalt
Eine Vielzahl von (kleineren) Anbietern auf dem Markt mit stark schwankenden Werkstoffqualitäten	Einschränkungen bei der Farbwahl	Hoher und fortgesetzter Prüfaufwand
Aufbau Second Source nicht immer realisierbar	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Viele Teile im Sichtbereich scheiden aus 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erstqualifikation / Lieferantenevaluation ▶ Materialqualifikation (Grundsatzprüfung) ▶ Bauteilprüfung ▶ Dauertest ▶ Chargenprüfung
High Quality Rezyklate sind preisgleich zu „virgin materials“ oder sogar teuer	Chargenbedingte Schwankungen	Pilotversuche bei laufender Serie schwierig
Lieferanten (Granulate / Bauteile) müssen koordiniert werden	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Farbe ▶ Mechanik ▶ Verarbeitungseigenschaften (Fließbild) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Werkzeugverfügbarkeit / Reinigungsaufwand ▶ Personalkapazitäten / Termine
		Umstellung oft nur mit Serienwechsel sinnvoll ¹⁰ → Vorlauf
		Lösungen für die Kundenkommunikation werden benötigt

Quelle: Schnarr 2020

5.1 Iterativer Prozess

Ein Produktdesign unter Verwendung von Kunststoffrezyklaten sollte nacheinander die vier Bereiche Materialauswahl und -beschaffung, Bauteilgeometrie, Formwerkzeug, und Herstellungsprozess adressieren und iterativ vorgehen (Feenstra und Onnekink 2020).

¹⁰ siehe aber weiter unten die Empfehlung, sich mit PCR-Materialien zunächst anhand bekannter und beherrschter Produktdesigns vertraut zu machen.

5.1.1 Materialauswahl

Der Einsatz von PCRs ist eine komplexe Designaufgabe und üblicherweise ist ein Ersatz („Drop-in“) von Primär- durch Sekundärkunststoff in einem Produkt nicht ohne weiteres möglich. Insbesondere die volle Freiheit bei der Farbgebung ist eine große Herausforderung für den PCR-Einsatz.

Zunächst einmal sollten Kunststoffe verwendet werden, die überhaupt recycelt werden, dies sind ABS, PC, PC/ABS, PP, HIPS, PA. Auch PE und PET sind sehr gut recycelbar, aber stammen nicht aus Elektro- und Elektronikprodukten, da sie dort nicht (in relevanten Mengen) verwendet werden. Die Anwendungsbeispiele in 4.4 beziehen sich dementsprechend auch nur ganz vereinzelt auf letztgenannte Polymere. Des Weiteren ist PP sehr gut recycelbar, stammt häufig aus anderen Quellen als Elektroaltgeräten, findet aber weit verbreitete Anwendung in Haushaltsgroßgeräten (Schnarr 2020).

Recycelter Kunststoff hat nicht die gleichen Eigenschaften wie Primärkunststoff. Das liegt an mehreren Faktoren, wie der Alterung von Kunststoffen im Gebrauch aber auch während der Verarbeitung in den Recyclingprozessen selbst, Additiven, der Trennschärfe der Recyclingprozesse, Verunreinigungen und Schwankungen in der Zusammensetzung je nach verarbeiteten EAG – um nur einige Faktoren zu nennen. Somit können sich Produktentwicklerinnen und -entwickler nicht auf ihre Erfahrungen mit einzelnen Polymeren verlassen, sondern müssen sich mit dem Recyclingkunststoff und seinen Eigenschaften auseinandersetzen, das heißt: Diese für die Zielanwendung testen in ihren Material- und Verarbeitungseigenschaften. Diese „Wissenslücke“ ist ein wesentliches Risiko für den PCR-Einsatz. Auch deswegen kann es hilfreich sein, zunächst mit post-industriellen Rezyklaten Erfahrungen zu sammeln, die von ihren Eigenschaften deutlich homogener sind und die näher am Primärkunststoff liegen.

Folgendes Beispiel mag die Wechselwirkung von Rezyklateinsatz und technischer Eignung für ein Produkt verdeutlichen: Schwarze Kunststoffe, die auch gut als Rezyklat erhältlich sind, sind üblicherweise mit Carbon Black gefärbt, das jedoch Strahlung abschirmt. Bei Funkanwendungen wie dem in 4.4 genannten Sensor ist daher zu testen, ob der Carbon Black Anteil problematisch ist¹¹.

Die Lieferanten von Kunststoffrezyklaten sind nicht die gleichen, wie diejenigen, die Primärkunststoff in großen Mengen und gut definierten Qualitäten bereitstellen. Damit kann sich ein Hersteller nicht auf bewährte Zulieferer verlassen, sondern muss neue Quellen eruiieren.

5.1.2 Bauteilgeometrie

Die Bauteilgeometrie als nächster zu berücksichtigender Aspekt ist dahingehend relevant, als dass die veränderten Prozessierungseigenschaften nahelegen, zunächst Erfahrungen mit eher einfachen Bauteilen zu sammeln. Geometrien mit größeren Bauteiltoleranzen sind zu bevorzugen. Eher dickwandige Teile sind mit Rezyklaten einfacher zu fertigen als besonders dünnwandige Bauteile. Fehlende Daten zum Moldflow-Verhalten in der Spritzgussform, bzw. Veränderungen des Materialflusses im Vergleich zum Primärkunststoff, erfordern vorab Tests für die Herstellung einzelner Bauteile.

Größere Bauteile, die mit PCR-Kunststoffen gefertigt werden, neigen zu einem stärkeren Schrumpf beim Abkühlen des Bauteils (Partners for Innovation 2015). Dieser Effekt kann z. B.

¹¹ In diesem Fall erwies sich der Carbon Black Anteil als nicht störend, wichtig ist jedoch solche möglichen Probleme rechtzeitig im Entwicklungsprozess zu erkennen und abzu prüfen

durch zusätzliche Rippen im Bauteil (bei entsprechend geändertem Formwerkzeug), die zusätzliche Stabilität bieten, gemindert werden.

5.1.3 Formwerkzeug

Es empfiehlt sich zunächst ein Recyclingkunststoff für ein bereits bestehendes Produkt einzusetzen, das bereits in allen seinen Eigenschaften bekannt ist, und das nur einfache Spritzgussformen erfordert.

Durch Verunreinigungen kann es zu – gegebenenfalls auch gesundheitsschädlichen – Ausgasungen kommen und Verschmutzungen des Formwerkzeugs, die häufigere Reinigung der Form erfordern. Durch Partikel im Rezyklat ist das Formwerkzeug möglicherweise auch stärkerem Abrieb unterworfen, was Auswirkungen auf die Oberflächengüte insbesondere bei Hochglanz-Oberflächen hat, in geringerem Maße aber auch bei anderen Oberflächenstrukturen.

Diese Probleme *können* bei Rezyklaten verstärkt auftreten, *müssen* aber nicht. Diesen Problemen kann teilweise entgegengewirkt werden durch z. B. bessere Filtration, jedoch wird dadurch der Gesamtprozess aufwändiger (z. B. durch häufigeren Austausch der Filter).

5.1.4 Herstellungsprozess

Auch der Verarbeiter des Kunststoffs muss adäquat in den Umstellungsprozess mit einbezogen werden. Der Zulieferer der Spritzgussteile muss das Material akzeptieren, trotz gesteigerter Risiken für den Prozess. Insbesondere eine gleichbleibende Qualität des Ausgangsmaterials von Los zu Los ist nicht unbedingt gegeben.

Durch Anpassungen des Herstellungsprozesses, ggf. mit besonders dafür ausgelegten Anlagen und Maschinen, können die schlechteren Materialeigenschaften der Rezyklate teilweise kompensiert werden (Roctool 2020): Nach Angaben von Technologieanbietern können insbesondere die Adaptierung der Temperaturverteilung im Moldprozess eine Oberflächenqualität erreicht werden, die hinsichtlich Fehlerfreiheit, Glanz und präzisiertem Abbild komplexer Strukturen einer Spritzgussform die sonst üblichen Limitierungen des Rezyklats kompensieren kann (Beispiel: recyceltes ABS/PC).

5.2 Beispielhafte PCR-Roadmap für Haushaltsgeräte

Im Rahmen des Fachgesprächs vom 20. Oktober 2020 skizzierte M. Schnarr eine Roadmap eines deutschen Herstellers u.a. von Haushaltsgroßgeräten für den verstärkten PCR-Einsatz bei Haushaltsgeräten für die nächsten 20 Jahre, die viele der oben angeführten iterativen Schritte aufgreift (Schnarr 2020): Ausgehend von PP-Anwendungen mit geringer Temperaturbelastung, geringen mechanischen Anforderungen und ohne bzw. beherrschbaren Farbspezifikationen sieht der nächste Schritt Anwendungen mit erhöhter Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastung für PP und mit Talkum gefülltem PP vor. In Reichweite sind PCR-ABS und PCR-HIPS für innere Bauteile ohne Medienbelastung und ohne Anforderungen an die Farbgebung. Erst mittelfristig wird der Schritt gesehen, PP und gefülltes PP für erhöhte Temperaturbelastungen und mit dann notwendigen konstruktiven Änderungen als PCR-Kunststoff einzusetzen.

Mit einem Zeithorizont von etwa 5 Jahren wird der PCR-Einsatz für folgende Fälle angestrebt:

- ▶ Flammgehemmtes PP, jedoch zunächst noch ohne die Anforderung an eine UL-Listung zu erfüllen (Sicherheitsanforderungen nach Tests von Underwriters Laboratories)
- ▶ PP und Talkum-gefülltes PP mit erhöhter Temperatur- und Medienbelastung, mit einem gewissen Zeitverzug auch als UL-gelistete Verwendung

Erst mit einem Zeithorizont über 2030 hinaus wird die Anwendung von glasfaser-gefülltem PP für erhöhte Temperaturbelastung im Bereich 95 °C, mit Laugenkontakt und hoher mechanischer Belastung gesehen, ebenso grundsätzlich lebensmittelechte Polymere.

Dieser Roadmap liegt das Verständnis zugrunde, dass die jeweiligen Teile zu (nahezu) 100 % aus PCR-Material hergestellt werden sollen. Eine Beimischung von PCR-Kunststoffen zu Primärmaterial könnte jeweils deutlich früher erfolgen.

5.3 Beurteilung der Komplexität des Umstellungsprozesses

Um die Komplexität und Herausforderungen der Umstellung eines Elektro- oder Elektronikprodukts auf den Rezyklateinsatz adäquat beurteilen zu können, hat das Unternehmen Pezy im Projekt PolyCE ein Einstufungssystem entwickelt und erprobt (Feenstra, Onnekink 2020; Dimitrova et al. 2020). Unterschieden werden die Fälle

1. Material ist verfügbar, Umstellung ist ökonomisch machbar und Stand der Technik
2. Material ist nur begrenzt verfügbar und muss nach Anforderung compoundingiert werden, relevante Entwicklungszeit und -kosten
3. Wenige Materialien verfügbar, eher als langfristige Entwicklung anzusehen, begrenzte Designfreiheit
4. Material (noch) nicht verfügbar und/oder hohes Risiko

Nach dem Stand der Technik für den PCR-Einsatz sind bei PE, PP, PS, ABS, PC/ABS, PC und ggf. PET für äußere Teile strukturierte Oberflächen oder Seiden-Glanz realisierbar, sowie bezüglich der Farbe schwarze oder graue Teile.

Schon etwas schwieriger ist die Umsetzung von glänzenden oder gar hoch-glänzenden Oberflächen, sowie von Pastellfarben und dunklen Farbtönen außer Schwarz und Grau. In hellen Kunststoffteilen sind Verunreinigungen in Form von Partikeln deutlich sichtbarer als in dunklen Teilen.

Als nicht realisierbar gelten derzeit Kunststoffteile, die transparent sein müssen oder wo volle Farbfreiheit gegeben sein muss. Ebenso sind Teile mit hoher Schlagzähigkeit schwer zu realisieren – die Staubsaugerbeispiele zuvor zeigen jedoch, dass schlagfeste Teile grundsätzlich machbar sind.

Interne Teile sind dagegen viel einfacher zu realisieren, da die Anforderungen an das Erscheinungsbild deutlich geringer sind.

Nicht mit PCR-Recyclingkunststoff ausführbar sind nach derzeitigem Stand Anwendungen in der Medizintechnik, lebensmittelechte Kunststoffe (sofern nicht gezielt ein Kunststoffstrom aus lebensmittelechten Quellen, wie z. B. Kühlschränkenverkleidungen, separiert wird) und Spielzeug.

5.4 Materialqualitäten

Wie bereits von Vito und Ökopol in einer Studie für ECOS empfohlen (Fayole et al. 2019), ist die Entwicklung von standardisierten Kategorien, bzw. Qualitäten von recyceltem Kunststoff hilfreich, um potenziellen Anwenderinnen und Anwendern die Auswahl und Beurteilung der Materialien für den eignen Einsatzzweck zu erleichtern: „Die Verwendung von Kunststoffrezyklaten in Produkten könnte weiter unterstützt werden, indem verschiedene Kategorien von recyceltem Kunststoff basierend auf ihren technischen Eigenschaften und ihrer Eignung für bestimmte Anwendungen kategorisiert werden“ (ebd.). Eine solche Kategorisierung könnte sich z. B. an den Anwendungsfeldern und Material- und Bauteilanforderungen wie in

Tabelle 10, S. 45 aufgeführt orientieren.

5.5 Zwischenfazit

Die Einführung von PCR-Kunststoffen ist ein komplexer Prozess, der zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen hat. Ein iteratives Vorgehen bietet sich an, damit ist aber auch ein erheblicher zeitlicher Vorlauf verbunden. Die Materialeigenschaften sind von entscheidender Bedeutung, zumal diese auch Anforderungen an das Teiledesign nach sich ziehen können, ebenso ist der Verarbeitungsprozess anzupassen. PCR-Kunststoffe eignen sich nach derzeitigem Stand bei weitem nicht für alle Anwendungsfälle.

6 Eignung ausgewählter Produktgruppen für eine Rezyklateinsatzquote

Anhand der nachfolgenden Kriterienmatrix wurden relevante Produktgruppen bzgl. ihrer Eignung für eine Rezyklatquote eingeordnet. Die Beurteilung der Eignung berücksichtigt

- ▶ die Art der verwendeten Kunststoffe
- ▶ die Menge der verwendeten Kunststoffe
- ▶ die Sichtbarkeit der Kunststoffteile
- ▶ relevante Material- und Bauteilanforderungen sowie
- ▶ den aktuellen Stand hinsichtlich der Rezyklatanteile marktgängiger Geräte.

Ergänzend zu den materiellen Aspekten wurde durch die Gutachterinnen und Gutachter auch der aktuelle Stand der produktgruppenspezifischen Regulierung unter der Ökodesign-Richtlinie bzw. der Zeitpunkt der nächsten Revision betrachtet.

Das Ergebnis der Bewertung wurde in der nachfolgenden Tabelle kodiert (--: ungeeignet / Kriterium nicht erfüllbar, -: weniger geeignet / Kriterium schwer zu erfüllen, +: tendenziell geeignet / Kriterium erfüllbar, ++: geeignet / Kriterium gut erfüllbar).

Einige Produktgruppen weisen Kunststoffteile auf, die bislang nicht mit PCR-Kunststoffen realisiert werden können, außer es werden sehr gut kontrollierte, kleinteilig separat erfasste Kunststoffe verwendet. Die betreffenden Teile sind zum Beispiel transparente Frontscheiben von Displays oder Fernsehern oder Innenverkleidungen von Kühl- und Gefriergeräten, die mit Lebensmitteln in Kontakt sind.

Bei den Materialanforderungen sind Geräte im Vorteil, die dickwandige Bauteile aufweisen oder bei denen mechanische Belastungen im Gebrauch weniger auftreten. Zu den nicht näher ausgeführten limitierenden Eigenschaften gehören Kontakt mit heißen Flüssigkeiten oder Medien wie Waschlauge, aber auch Anforderungen an die Flammhemmung.

Für einige Produktgruppen steht in Kürze eine Regulierung bzw. deren Revision an (Computer, Smartphones), so dass hier zügig eine Implementierung in die Gesetzgebung möglich wäre. Zahlreiche andere Regulierungen einzelner Produktgruppen (insbesondere Haushaltsgeräte) haben jedoch gerade erst einen Revisionszyklus durchlaufen, so dass trotz guter technischer Machbarkeit des PCR-Einsatzes eine Regulierung kurz- oder mittelfristig nicht ansteht.

Tabelle 10: Eignung ausgewählter Produktgruppen in Bezug auf eine Rezyklateinsatzquote

Produktgruppe	Verwendung relevanter Kunststoffe	Mengenrelevant (Gesamtgewicht Kunststoffe)	Größere interne, rückseitige oder anderweitig kaum sichtbare Kunststoffteile	Dickwandiges Teiledesign möglich	Oberflächengüte unkritisch	Mechanische Beanspruchung gering	Farbgebung unkritisch	keine weiteren limitierenden Eigenschaften	Derzeitige Verbreitung PCR-Einsatz	Nächstmöglicher Zeitpunkt zur Umsetzung einer produktgruppenspezifischen Rezyklateinsatzquote: Revisionszyklus Ökodesign-RL
Drucker, Kopierer	++: ABS, PS, HIPS, PC/ABS	++	++	++	++	++	++	++	++	-: Überarbeitung der Freiwilligen Selbstverpflichtung aktuell kurz vor dem Abschluss; nächste Überarbeitung vermutlich in 2023
Kühlgeräte	--: Innenverkleidung lebensmittelecht									-: Überarbeitung in 2019 verabschiedet
	++: andere Teile (PS, PP)	+	++	++	++	++	+	++	+	
Waschmaschinen	++: PP	+	++	++	-	+	-	++	-	-: Überarbeitung in 2019 verabschiedet
kleine Küchengeräte	--: Teilweise Lebensmittelkontakt									--: <i>Toaster</i> : keine Regulierung, ++: <i>Wasserkocher</i> : Vorstudie läuft, +: <i>Kaffeemaschinen</i> : Vorstudie steht noch aus
	++: ABS, PP, PS	++	++	++	-	+	-	_12	+	
Staubsauger	++: ABS, PP, PS	++	++	++	-	-	-	++	++	-: Revision: KF fand im Oktober 2019 statt
Unterhaltungselektronik (Fernseher u.ä.)	--: Display (PMMA)									-: Überarbeitung in 2019 verabschiedet (Displays)
	++: Gehäuse (PC/ABS)	++ ¹³	++	++	-	++	-	_14	--	
Displays	--: Display (PMMA)									-: Überarbeitung in 2019 verabschiedet
	++: Gehäuse (PC/ABS, ABS)	++	++	++	+	++	+	_15	+	
Computer	--: PBT									++: Revision ist in Arbeit

¹² Temperaturbeständigkeit

¹³ Trend zu rahmenlosen, ggf. flexiblen OLED-Fernsehern mit deutlich geringeren Kunststoffmengen

¹⁴ Flammhemmung

¹⁵ Flammhemmung

Produktgruppe	Verwendung relevanter Kunststoffe	Mengenrelevant (Gesamtgewicht Kunststoffe)	Größere interne, rückseitige oder anderweitig kaum sichtbare Kunststoffteile	Dickwandiges Teiledesign möglich	Oberflächengüte unkritisch	Mechanische Beanspruchung gering	Farbgebung unkritisch	keine weiteren limitierenden Eigenschaften	Derzeitige Verbreitung PCR-Einsatz	Nächstmöglicher Zeitpunkt zur Umsetzung einer produktgruppenspezifischen Rezyklateinsatzquote: Revisionszyklus Ökodesign-RL
	++: Gehäuse (ABS, PC/ABS)	++	++	++	+	++	+	++	+	
Mobilgeräte IKT	--: PA, PMMA ++: PC, PC/ABS	-	--	-	-	-	-	++	-	++: Vorstudie läuft

7 Fazit

Die wesentliche Hürde für den PCR-Einsatz besteht für Hersteller von komplexen Produkten in dessen erstmaligem Einsatz. Ein anfangs geringer PCR-Gehalt kann und sollte daher zugestanden werden, um eine entsprechende Lernkurve zu ermöglichen. Da die Einführung von PCR-Kunststoffen zudem ein iterativer Materialbeschaffungs- und Design-Prozess ist, muss ein adäquater zeitlicher Vorlauf für die Umstellung gegeben sein, der mindestens zwei Jahre, eher drei bis vier Jahre beträgt.

Eine Forderung nach möglichst hohen PCR-Gehalten einzelner Komponenten stößt an technische Grenzen: Qualitätsmängel von PCR-Materialien lassen sich im Zuge des Compoundierens teilweise oder ganz ausgleichen, bedingt jedoch die Zumischung von Polymeren und / oder Additiven, die nicht dem PCR-Gehalt zuzurechnen sind.

Der Rezyklatgehalt kann nach derzeitigem Wissensstand nicht durch Materialanalytik bestimmt werden, so dass lediglich eine dokumentengestützte Nachweisführung möglich erscheint. Da eine Eigenerklärung des Herstellers bzw. seines Kunststofflieferanten (wie bei EPEAT praktiziert) potenziell Möglichkeiten zur Manipulation bietet, erscheint eine Nachweisführung des Rezyklatanteils auf der Basis von EuCertPlast derzeit am erfolgversprechendsten: Um auf das Endprodukt anwendbar zu sein, müssen die zertifizierten Rezyklatmengen aber durch die weitere Verarbeitungskette (Compounder, Kunststoffverarbeiter) bis zum Endgerätehersteller nachverfolgbar dokumentiert werden. Da die Rezyklatanteile nur pro Kunststoffsorte, aber nicht für jede einzelne Qualitätsstufe zertifiziert werden, wird es Abweichungen des realen Rezyklatanteils vom zertifizierten Rezyklatgehalt geben können. Eine Pflicht zum PCR-Einsatz kann zudem eine faktische Handelbeschränkung darstellen, wenn die Zertifizierungsvoraussetzungen von außereuropäischen Herstellern nicht gleichermaßen erfüllt werden können. EuCertPlast ist insbesondere in der EU verbreitet und außerhalb der EU ist keine vergleichbaren Zertifizierungen bekannt. Entsprechend wäre zu prüfen, ob eine solche Maßnahme eine gerechtfertigte Ausnahme im Kontext des Welthandelsrechts darstellt. Zu berechnen ist der Rezyklatgehalt auf der Basis von DIN EN 45557.

Eine Unterscheidung von PCR-Kunststoffen nach Herkunftsquellen (z. B. vergleichbar zur Unterscheidung bei EPEAT zwischen PCR-Kunststoffen aus IT-Geräten und aus anderen Anwendungen) erscheint nicht notwendig, da für Elektro- und Elektronikgeräte benötigte Kunststoffe zwangsläufig aus technischen Anwendungen stammen müssen und sich so eine Kreislaufführung technischer Kunststoffe bei erhöhten Anforderungen an den PCR-Einsatz automatisch ergäbe. Auch eine „Kannibalisierung“ anderer hochwertiger Anwendungen für Kunststoffrezyklate durch einen erhöhten Einsatz für Elektro- und Elektronikgeräte ist nicht zu erwarten, da Polymere aus anderen Anwendungen nach derzeitigem Stand kaum geeignet sind für Anwendungen im Bereich Elektro- und Elektronikgeräte. Eine Ausnahme bildet PP, das in großen Mengen in Haushaltsgroßgeräten eingesetzt wird und auch aus anderen Quellen als Elektroaltgeräten in größeren Mengen anfällt. Hier spielt der Einsatz aus Nicht-EAG-Quellen ggf. eine Rolle und eine entsprechende Differenzierung auch bei den Anforderungen kann sinnvoll sein.

Im IKT-Endgerätebereich kann die Einführung von PCR-Kunststoffen zunächst für Monitore, Desktop PCs und All-in-One-Computer und erst nachfolgend für Laptops und Tablets sinnvoll sein, da erstere günstigere Voraussetzungen für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten

Möglichkeiten bieten, z. B. dickwandigere Teile aus PCR-Kunststoffen zu fertigen (Vlugter 2017).¹⁶

Vorgaben für den Rezyklatgehalt für einzelne, bestimmte Bauteile erscheinen hingegen nicht sachgerecht. Aufgrund der beschriebenen „Schwierigkeitsgrade“ PCR-Kunststoffe für die diversen Teile eines komplexen Elektro- oder Elektronikgeräts zu verwenden, kann und sollte die Entscheidung den Unternehmen überlassen werden, welche konkreten Teile unter PCR-Einsatz gefertigt werden. Dies umso mehr als das Ziel einer solchen Anforderung ja die quantitative Stärkung der Nachfrage als solches ist, und weniger technische Detaillösungen für einzelne Bauteile.

Insbesondere im Fachgespräch vom 20. Oktober 2020 wurden weitere Aspekte benannt, die bei einer potenziellen Einführung einer Rezyklateinsatzquote unbedingt zu beachten sind:

- ▶ Derzeit unternehmen eine größere Anzahl von Unternehmen bereits erhebliche Anstrengungen, den Einsatz von PCR-Kunststoffen zu forcieren (z. B. im Rahmen der Circular Plastics Alliance) und mit entsprechenden Versprechen gegenüber der KOM, so dass sich Teile des Marktes erkennbar in Richtung eines vermehrten Einsatzes von Kunststoffrezyklaten bewegen.
- ▶ Es besteht aktuell ein „Versorgungsengpass“ mit PCR-Kunststoffen für energieverbrauchsrelevante Produkte, weil die Unwägbarkeiten der künftigen Stoffregulierung aus Sicht potenzieller Investoren ein erhebliches Investitions- und Ausbauhemmnis für weitere Recyclingkapazitäten darstellen. Damit besteht die Gefahr, dass aufgrund von Lieferunsicherheiten zeitweise eine Produktion konformer Geräte infrage gestellt sein könnte.
- ▶ Die Standardisierung von Rezyklatqualitäten und -eigenschaften ist ein (in Arbeit befindlicher) wesentlicher Zwischenschritt, um eine ökonomische und technische Sicherheit hinsichtlich der verarbeiteten Materialien zu erreichen.

¹⁶ Siehe schrittweise Einführung von PCR-Kunststoffen bei Dell

8 Empfehlungen für Anforderungen unter der Ökodesign-Richtlinie

Aus der vorliegenden Analyse leiten sich folgende Empfehlungen für die Stärkung des Einsatzes von PCR-Kunststoffen im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie ab:

- ▶ Aufgrund der sehr verschiedenartigen technischen Anforderungen an die verschiedenen Produkte ist die Festlegung einer produktgruppenübergreifenden Rezyklateinsatzquote als horizontale Maßnahme nicht sinnvoll umsetzbar. Nur durch produktgruppenspezifische Betrachtungen können bestehende Möglichkeiten und zu beachtende Grenzen sachgerecht recherchiert und mit den jeweiligen Branchenexpertinnen und -experten debattiert werden. Der Nachteil von produktgruppenspezifischen Quoten ist der zeitliche Verzug, da hierfür die Revisions-Zyklen einzelner Produktgruppen abgewartet werden müssen.
- ▶ In mehreren Produktgruppen finden sich Kunststoffanwendungen, die sich derzeit nicht mit verfügbaren PCR-Materialien realisieren lassen (etwa transparente Kunststoffe, Kunststoffe mit Kontakt zu Lebensmitteln, Leiterplatten), so dass produktgruppenspezifische Rezyklateinsatzquoten diesen Begrenzungen Rechnung tragen sollten.
- ▶ Aufgrund des großen Anteils an IT-Geräten, die das Kriterium für PCR-Einsatz unter EPEAT erfüllen (und damit die Machbarkeit ausreichend nachgewiesen ist), ließe sich dieses Kriterium als Minimalanforderung unter der Ökodesign-Richtlinie für Computer stellen. Bei den meisten der in Tabelle 11 aufgeführten IT-Geräte finden sich zudem üblicherweise größere Kunststoffteile, die entweder gar nicht oder zumindest im normalen Gebrauch nicht sichtbar sind, wie Rückseiten und Standflächen und sich daher für den Einsatz von PCR-Kunststoffen besonders eignen.

Tabelle 11: Computer – Vorschläge für Minimum-Anforderungen an den PCR-Gehalt unter der Ökodesign-Richtlinie (in Anlehnung an EPEAT-Kriterium 4.2.1.2)

Produkttyp	Minimaler PCR-Kunststoffanteil am eingesetzten Gesamtkunststoff
Desktop Computer, Workstation, Thin-Client, tragbare All-in-One Computer, kleine Server	10
Integrierte Desktop Computer	15
Notebooks	5
Tablets	3

Von der Berechnung der Gesamtkunststoffmenge in Anlehnung an EPEAT ausgenommen: u.a. Leiterplatten, Kabel, Stecker

- ▶ Aus den derzeit anstehenden Regulierungen bzw. Revisionen bestehender Regulierungen könnte kurzfristig die Produktgruppe Computer adressiert werden. Auch in die laufende Vorstudie zu Smartphones (Fraunhofer 2020) könnte das PCR-Thema derzeit eingespeist werden. Allerdings würde damit eine Produktgruppe adressiert, in der der PCR-Einsatz besonderen technischen Herausforderungen unterliegt und die zudem nur einen mäßigen Kunststoffverbrauch aufweist. Mittelfristig können Wasserkocher und insbesondere Kaffeemaschinen mit Anforderungen an den PCR-Einsatz belegt werden, zumal es im Bereich Kaffeemaschinen bereits mehrere Umsetzungsbeispiele gibt.

- ▶ Ausnahmen von der Berechnung des PCR-Anteils nach DIN EN 45557:2020 wären –in Anlehnung an IEEE1680.1 – Leiterplatten, Label, Kabel, Stecker, Verbinder, Elektronikkomponenten, optische Komponenten, Komponenten zum Schutz vor elektrostatischer Entladung, Komponenten zur Vermeidung elektro-magnetischer Interferenzen, Klebstoffe, Beschichtungen, sowie externe Hüllen und Spezialteile wie Drehlager und Scharniere, und externe Komponenten, die gemeinsam mit dem Produkt verkauft werden.
- ▶ Es kann sinnvoll sein, einen minimalen Kunststoffgehalt eines Produktes festzulegen, ab dem überhaupt erst eine PCR-Anforderung greift, um für Produkte mit nur sehr geringen Kunststoffgehalten kein aufwändiges Redesign mit nur sehr begrenzter Wirkung zu fordern.
- ▶ In Vorbereitung auf eine Rezyklateinsatzquote könnte zunächst eine Deklarationspflicht des PCR-Gehalts eingeführt werden, verbunden mit einer entsprechenden Berichterstattung an die KOM, um zunächst eine verbesserte Verbraucherinformation zu gewährleisten und den Informationsstand zu bestehenden Aktivitäten zu verbessern. Auch eine solche Anforderung erfordert selbstverständlich standardisierte Berechnungs- und (dokumentenbasierte) Nachweisverfahren.

9 Quellenverzeichnis

- Apple Inc. (2019): Environmental Responsibility Report 2019. Progress Report, covering fiscal year 2018.
- Bage Plastics (o.J.): Kunststoff Recycling ist Handeln im Auftrag der Umwelt, <https://bage-plastics.com/umwelt/> (Zugriffsdatum: 3.12.2020)
- Bage Plastics (o.J.a): Über uns, <https://bage-plastics.com/ueber-uns/> (Zugriffsdatum: 3.12.2020)
- Becker, I. (2020): Nachweisführung des Rezyklatgehalts bei Elektro- und Elektronikgeräten: Möglichkeiten und Herausforderungen. Fachdialog "Rezyklateinsatzquote für energieverbrauchsrelevante Produkte unter der Ökodesign-Richtlinie?", 20.10.2020, Dessau / Berlin / Hamburg.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (2017): Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott. Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel und polychlorierte Biphenyle in elektrischen und elektronischen Kleingeräten.
- Dell (o.J.): Recycled Materials, <https://corporate.delltechnologies.com/en-us/social-impact/advancing-sustainability/sustainable-products-and-services/materials-use/recycled-materials.htm#scroll=off>, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)
- Dimitrova, G.; Berwald, A.; Feenstra T.; Hoeggerl, G.; Nissen, N. F.; Schneider-Ramelow, M. (2020): Design for and Design from Recycling: The Key Pillars of Circular Product Design. In: Proc. of International Congress Electronics Goes Green 2020+, 01.09.2020, Berlin.
- Dimitrova, G.; Schischke, K.; Chancerel, P.; Berwald, A.; Ruediger, A.; Walther, C. et al. (2018): Encouraging the uptake of recycled plastics from WEEE - The potential of ecolabels. In: Going Green CARE INNOVATION, Wien (Schloss Schönbrunn), 26.-29.11.2020, Wien.
- DIN EN 15343:2008-02, 2008: Kunststoffe - Kunststoff-Rezyklate - Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung der Konformität und des Rezyklatgehalts.
- DIN EN 45557:2020: Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten.
- DIN EN ISO 14021 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)
- DIN SPEC 91446, 2020-09: Standards for trading (via digital platforms) and processing plastic waste feedstock and recyclates.
- Dworak, C. (2020): mündliche Mitteilung, im Fachdialog vom 20.10.2020
- EuCertPlast (2020): Certified Recyclers, List of recyclers with a valid EuCertPlast Certification, <https://www.eucertplast.eu/certified-recyclers>, (Zugriffsdatum: 15.Juni 2020)
- Eure, J. (2020): Reimagining Plastic Recycling for Technology and the Planet, <https://news.lenovo.com/reimagining-plastic-recycling-for-technology-and-the-planet/>, 22.4.2020, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)
- Europäische Kommission (o.J.): Circular Plastics Alliance, https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/circular-plastics-alliance_en, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)
- Europäische Kommission (2019): WORKING DOCUMENT Assessment report of the voluntary pledges under Annex III of the European Strategy for Plastics in a Circular Economy. Brüssel ({SWD(2019) 91 final}).
- Fayole, C.; Fedrigo, D.; Konlecka, K.; Popescu, I. (2019): For Better not Worse. Applying Ecodesign Principles to Plastics in the Circular Economy. Unter Mitarbeit von Le Blevenec, K.; Jepsen, D.; Rödig, L.; Vanderreydt, I.; Wirth, O. Brüssel. Online verfügbar unter <https://ecostandard.org/wp-content/uploads/2019/06/APPLYING-ECODESIGN-PRINCIPLES-TO-PLASTICS.pdf>. (Zugriffsdatum: 30.11.2020)

Feenstra, T.; Onnekink, J. (2020): Circular plastics in product development. Webinar. 3.6.2020.

Fraunhofer IZM (2020): Ecodesign preparatory study on mobile phones, smartphones and tablets, <https://www.ecosmartphones.info/> (Zugriffsdatum: 30.11.2020)

Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU (2019): European strategy for plastics - voluntary pledges - Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU - European Commission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/growth/content/european-strategy-plastics-voluntary-pledges_de, (Zugriffsdatum: 16.07.2020).

Gort, I.; Gerrits, A. (2015): Designing with Recycled Plastics – Guideline; Amsterdam, 2015.

Green Electronics Council (2019): Outcomes Report - EPEAT Verification Round PC-2018-04. Online verfügbar unter <https://greenelectronicscouncil.org/wp-content/uploads/2019/01/P41-Outcomes-Report-PC-2018-04-updated-FINAL.pdf>, (Zugriffsdatum: 11.10.2020).

Green Electronics Council (2020): EPEAT Registry. Online verfügbar unter <https://epeat.net/>, (Zugriffsdatum: 17.6.2020).

Hein, B. (2020): Überblick über DIN-Aktivitäten im Bereich Circular Economy. Arbeitskreis Rechtskonformes Umweltmanagement in der Elektronikindustrie, 51. Treffen, Fraunhofer IZM, 11.11.2020, Berlin.

IEEE 1680.1a, 2020: IEEE Standard for Environmental and Social Responsibility Assessment of Computers and Displays--Amendment 1: Editorial and Technical Corrections and Clarifications.

IEEE 1680.2a, 2017: IEEE Standard for Environmental Assessment of Imaging Equipment - Amendment 1.

IEEE 1680.3a, 2017: IEEE Standard for Environmental Assessment of Televisions - Amendment 1.

Lenovo (o.J.): Recycled Content, <https://www.lenovo.com/us/en/sustainability-recycled-content> (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

Maile, K. (2019): Samsung designs products with recycling in mind, <https://www.recyclingtoday.com/article/qa-with-samsung-director-of-corporate-affairs-electronics-recycling/>, 20.5.2019, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

Maisel, F.; Emmerich, J.; Dimitrova, G.; Berwald, A.; Nissen, N. F.; Schneider-Ramelow, M. (2020): Using Post-Consumer Recycled Plastics in new EEE: A promising Circular Business Model for the Electronics Sector. In: Proc. of International Congress Electronics Goes Green 2020+, 1.9.2020, Berlin.

MBA Polymers (o.J.): Production Unit United Kingdom, <https://mbapolymers.com/company/locations/#united-kingdom>, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

MBA Polymers (o.J.a): Production Unit Germany, <https://mbapolymers.com/company/locations/#germany>, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

MGG Polymers (2020): Volumen und Zusammensetzung von WEEE-Kunststoffen in Europa, <https://mgg-polymers.com/de/news/blog/volumen-und-zusammensetzung-von-weee-kunststoffen-in-europa>, 22.Mai 2020 (Zugriffsdatum: 15.6.2020)

Morf, L.S.; Tremp, J.; Gloor, R.; Huber, Y.; Stengele, M.; Zennegg, M. (2005): Brominated Flame Retardants in Waste Electrical and Electronic Equipment: Substance Flows in a Recycling Plant, Environ. Sci. Technol. 2005, 39, 22, Seiten 8691–8699.

Partners for Innovation (2015): Designing with Recycled Plastics.

Philips (2014): Philips' SENSEO Up coffee maker small in size but big in recycled plastics, Guardian International, <http://www.theguardian.com/sustainable-business/design-challenge-philips-senseo-coffee-recycled-plastics> und <http://circulareconomies.blogspot.com/2014/04/philips-senseo-up-coffee-maker-small-in.html>, 17.4.2014 (Zugriffsdatum: 30.11.2020).

Philips (o.J.): SENSEO Original goes the extra mile to use recycled plastics, <https://www.philips.de/a-w/ueber-philips/nachhaltigkeit/sustainable-planet/circular-economy/senseo.html> (Zugriffsdatum: 30.11.2020).

Philips (o.J.): Our approach to recycling, <https://www.philips.com/a-w/about/sustainability/sustainable-planet/circular-economy/recycle.html> (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

PlasticsEurope (2019): The Circular Economy for Plastics - A European Overview.

RAL (2018): % Recycling Kunststoff. Nachweis für den Anteil an Rezyklaten aus haushaltsnahen Wertstoffsammlungen - Gütesicherung (RAL-GZ 720). https://www.ral-guetezeichen.de/gz-einzelansicht/?gz=gz_720 (Zugriffsdatum: 15.6.2020)

RAL (2019a): DE-UZ 160. Router. Blauer Engel - Das Umweltzeichen. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20160-201801-de%20Kriterien.pdf>. (Zugriffsdatum: 01.07.2020).

RAL (2019b): DE-UZ 30a. Produkte aus Recyclingkunststoffen. Blauer Engel - Das Umweltzeichen. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%2030a-201901-de%20Kriterien.pdf>. (Zugriffsdatum: 01.07.2020).

RAL (2020a): DE-UZ 200. Schreibgeräte und Stempel. Blauer Engel - Das Umweltzeichen. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20200-201601-de%20Kriterien.pdf>. (Zugriffsdatum: 01.07.2020).

RAL (2020b): DE-UZ 205. Bürogeräte mit Druckfunktion (Drucker und Multifunktionsgeräte). Blauer Engel - Das Umweltzeichen. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20205-201701-de%20Kriterien.pdf>. (Zugriffsdatum: 01.07.2020).

Recycling Magazine (2020): New technology for WEEE plastics recycling, <https://www.recycling-magazine.com/2020/01/08/new-technology-for-weee-plastics-recycling/>, 8.1.2020, (Zugriffsdatum: 3.12.2020)

Roctool (2020): Elevated Sustainability | Roctool. Online verfügbar unter <https://www.roctool.com/work/elevated-sustainability>, (Zugriffsdatum: 10.11.2020).

Ross, V.; Choong, H. (1996): HP Deskjet printers with recycled plastics: a success story. In: Proceedings of the 1996 IEEE international symposium on electronics and the environment. 1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1996. Dallas, TX, USA, 6.-8. Mai 1996, S. 53–57.

Samsung (o.J.): Caring for the Environment, <https://www.samsung.com/mm/aboutsamsung/sustainability/environment/>, (Zugriffsdatum: 15.6.2020)

Schnarr, M. (2020): Einsatzbereiche von PCR-Kunststoffen: Ist-Situation, aktuelle Hemmnisse und Potenziale aus Sicht eines Geräteherstellers. Fachdialog "Rezyklateinsatzquote für energieverbrauchsrelevante Produkte unter der Ökodesign-Richtlinie?", 20.10.2020, Dessau / Berlin / Hamburg.

Setayesh, S. (2019): Erfahrungen mit dem Einsatz von Kunststoffrezyklaten: Technische Anforderungen, Umsetzung, Produktbeispiele. Arbeitskreis Rechtskonformes Umweltmanagement in der Elektronikindustrie, 47. Treffen, Fraunhofer IZM, 18.6.2020, Berlin.

Slijkhuis, C. (2020): Verfügbarkeit von Kunststoffrezyklaten und -qualitäten für Elektro- und Elektronikgeräte. Fachdialog "Rezyklateinsatzquote für energieverbrauchsrelevante Produkte unter der Ökodesign-Richtlinie?", 20.10.2020, Dessau / Berlin / Hamburg.

Slijkhuis, C. (2020a): mündliche Mitteilung, im Fachdialog vom 20.10.2020

Tange, L.; van Houwelingen, J. A.; Peeters, J. R.; Vanegas, P. (2013): Recycling of flame retardant plastics from WEEE, technical and environmental challenges. In: Adv produc engineer manag 8 (2), S. 67–77.

Vincenti, N.; Wagner, E.; Campadello, L.; Chancerel, P.; Liravi, P.; Dimitrova, G. et al. (2018): Where the shoe pinches - tackling current market challenges for recycling plastics from WEEE. In: Going Green CARE, Wien (Schloss Schönbrunn), 26.-29.11.2020, Wien. INNOVATION.

Vlugter, J. (2017): Scaling Recycled Plastics Across Industries. Hg. v. Ellen MacArthur Foundation.

Wagner, F.; Bracquene, E.; Wagner, E.; Keyzer de, J.; Duflou, J. R.; Dewulf, W.; Peeters, J. R. (2020): Grading system for Post-Consumer recycled plastics from WEEE. In: Proc. of International Congress Electronics Goes Green 2020+, 1.9.2020, Berlin.

Wilts, H.; von Gries, N.; Dehne, I.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Sanden, J. (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau.