Masterarbeit

Ökobilanz für die Aufbereitung gebrauchter Videoprojektoren zur Wiederverwendung

vorgelegt von
Chui Wan Cheung
[redacted]
abgegeben am 26.11.2015

Fachgebiet Audiokommunikation und -technologie
Institut für Sprache und Kommunikation
Fakultät I Geistes- und Bildungswissenschaften
Technische Universität Berlin

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den 26.11.2015 _____

Chui Wan Cheung

Ökobilanz für die Aufbereitung gebrauchter Videoprojektoren zur Wiederverwendung

Durchführung der Studie:	Chui Wan Cheung
Erstgutachter:	Prof. Dr. Stefan Weinzierl Fachgebiet Audiokommunikation und -technologie Institut für Sprache und Kommunikation Fakultät I Geistes- und Bildungswissenschaften Technische Universität Berlin
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Matthias Finkbeiner
Betreuung:	Dr. René Scheumann Fachgebiet Sustainable Engineering Institut für Technischen Umweltschutz Fakultät III Prozesswissenschaften Technische Universität Berlin
In Zusammenarbeit mit:	Dipl.-Ing. Jonas Huber Dipl.-Ing. Jan Schulte Janine Busch ReBeam GmbH Recycling & Recommerce Skalitzer Strasse 100 10997 Berlin

Zusammenfassung

Videoprojektoren gehören zu den audiovisuellen Kommunikationstechnologien und weisen als elektronische Produkte eine komplexen Materialzusammensetzung auf. Sowohl die Herstellung als auch die Nutzung elektronischer Produkte sind mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. Vor diesem Hintergrund stellt sich bei verbrauchsintensiven Geräten die Frage, ob sich die Umweltbelastungen bei Verlängerung der Nutzungsdauer oder Austausch durch energieeffizientere Produkte reduzieren lassen. In der vorliegenden Ökobilanz wurden die Anteile der Komponenten am Produktionsaufwand sowie die Beiträge der Lebenswegabschnitte am Produktlebenszyklus eines durchschnittlichen Projektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung untersucht. Weiterhin wurde die Amortisationszeit der Herstellungsemissionen eines energieeffizienten Neugeräts ermittelt. Mit der Methode der Ökobilanz wurden die Umweltauswirkungen eines gebrauchten Projektors gegenüber einem 5% bzw. 10% energieeffizienteren Neugerät unter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus vergleichend ermittelt.

Die Beitragsanalyse hat gezeigt, dass die elektronischen Komponenten in Abhängigkeit von der betrachteten Wirkungskategorie mit 70,0%-98,4% einen wesentlichen Beitrag am Gesamtherstellungsaufwand eines durchschnittlichen Projektors verursachen. Bei der Analyse der Subkomponenten wurden die Integrierten Schaltungen mit dem größten Anteil der potenziellen Umweltauswirkungen gemessen am Produktionsaufwand in 8 von 18 Wirkungskategorien identifiziert. Weiterhin wurde für die Nutzungsphase bei einer Gesamtnutzungsdauer von 7 Jahren mit 444,1 kg CO_2-eq. bzw. 10.014 MJ ein höherer Anteil am Gesamtergebnis für den Klimawandel sowie Primärenergieverbrauch eines Projektors ermittelt als die Produktionsphase in Höhe von 80,7 kg CO_2-eq. bzw. 1214 MJ. Trotzdem weist die Studie nach, dass der Umweltaufwand bei der Produktion eines energieeffizienten Neugeräts für Projektoren höher ist als die erzielte Einsparung bei der Nutzung und somit die Aufbereitung und Wiederverwendung eines verbrauchsintensiveren Gebrauchsgeräts die umweltverträglichere Alternative darstellt. Die Amortisationsanalyse hat gezeigt, dass die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen so hoch sind, dass diese durch eine Energieeffizienzsteigerung bei der Nutzung erst nach längeren Zeiträumen als die tatsächlich gegebenen Nutzungsphasen kompensiert werden. Die Amortisationszeit beträgt 14 Jahre bei einem 5% energieeffizienteren Neugerät bzw. 10 Jahre im Falle eines 10% energieeffizienteren Neugeräts. Die Aufbereitung und Wiederverwendung eines Gebrauchtgeräts resultiert in einem Entlastungspotenzial in Höhe von 58,0 kg CO_2-eq. für den Klimawandel, 781 MJ für den Primärenergieaufwand und 30,7 kg Fe-eq. für den Metallverbrauch im Vergleich zu einem 5% energieeffizienteren Neugerät bzw. 52,6 kg CO_2-eq. für den Klimawandel, 659 MJ für den Primärenergieaufwand und 30,7 kg Fe-eq. im Vergleich zu einem 10% energieeffizienteren Neugerät.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass eine verlängerte Nutzungsdauer eines Gebrauchtgeräts gegenüber dem Austausch durch ein energieeffizienteres Neugerät für Projektoren in Bezug auf ihre Umweltverträglichkeit eindeutig zu empfehlen ist, solange der Aufbereitungsaufwand geringer ist als die Produktionsemissionen und sich Neuerscheinungen im Materialverbrauch sowie Energiebedarf nicht wesentlich von ihren Vorgängermodellen unterscheiden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung....1
2 Methoden....3
2.1 Ökobilanz....3
2.1.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens....3
2.1.2 Sachbilanz....4
2.1.3 Wirkungsabschätzung....4
2.1.4 Auswertung....5
2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen....5
2.3 Funktionelle Einheit....6
2.4 Produktsystem....7
2.4.1 Produktion....8
2.4.2 Nutzung....9
2.4.3 Aufbereitung durch ReBeam....10
2.4.4 Entsorgung....11
2.4.5 Transporte....11
2.5 Systemgrenzen und Abschneidekriterien....12
2.6 Allokationsverfahren....12
2.7 Datenqualität....13
2.8 Methoden der Wirkungsabschätzung....14
2.9 Berechnung der Amortisationszeit....15
3 Ergebnisse....16
3.1 Sachbilanz....16
3.2 Wirkungsabschätzung....16
3.2.1 Produktionsaufwand der Komponenten....16
3.2.2 Produktlebenszyklus bei Aufbereitung und Wiederverwendung....21
3.2.3 Vergleich von Gebrauchtgerät und Neugerät....23
3.3 Berechnung der Amortisationszeit....26
4 Diskussion....27
4.1 Auswertung....27
4.1.1 Beitrag der Komponenten am Gesamtherstellungsaufwand....27
4.1.2 Beitrag der Lebenszyklusphasen am Gesamtlebenszyklus....27
4.1.3 Vergleich von Gebrauchtgerät und Neugerät....28
4.1.4 Amortisationszeit....29
4.2 Sensitivitätsanalyse....29
4.2.1 Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase....30
4.2.2 Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase....31
4.2.3 Amortisationszeit bei Anpassung des Energieträgers und Bezugsraums....32
4.3 Schlussfolgerung....34
Literaturverzeichnis....I
Anhang....IV
A Neugeräte....IV
B Modellpläne aus GaBi 6.0....V
C Input/Output - Bilanzen....XI
D Comparative case study re-using video projectors - A question of allocation and energy transition....XV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Wesentliche Bestandteile einer Ökobilanz 3
Abb. 2 NEC NP400 6
Abb. 3 Sanyo PLC-XD2200 6
Abb. 4 Epson EB-93e....6
Abb. 5 Prozessfließbild des untersuchten Produktsystems....8
Abb. 6 Rebeam 10
Abb. 7 Allokationsverfahren der outputorientierten Substitution....13
Abb. 8 Midpoint- und Endpoint-Ansatz der ReCiPe 2008-Methode....14
Abb. 9 Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Hauptkomponenten des Epson EB93....18
Abb. 10 Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Hauptkomponenten eines durchschnittlichen Projektors 18
Abb. 11 Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Subkomponenten des Epson EB93....19
Abb. 12 Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Subkomponenten eines 19
durchschnittlichen Projektors 19
Abb. 13 Endpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Komponenten des Epson EB93....20
Abb. 14 Endpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors 20
Abb. 15 Treibhausgaspotenzial eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei Aufbereitung und Wiederverwendung....21
Abb. 16 Primärenergieaufwand eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei Aufbereitung und Wiederverwendung....22
Abb. 17 Metallverbrauchspotenzial eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei 23
Aufbereitung und Wiederverwendung....23
Abb. 18 GWP-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät mit 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung....24
Abb. 19 KEA-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät mit 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung. 25
Abb. 20 MDP-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät bei 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung....26
Abb. 21 Sensitivitätsanalyse des GWP-Entlastungspotenzials bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase....31
Abb. 22 Sensitivitätsanalyse des GWP-Entlastungspotenzials bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase....32
Abb. 23 Produktlebenszyklus des Epson EB93....V
Abb. 24 Produktion der Hauptkomponenten des Epson EB93....V
Abb. 25 Produktion des Gehäuses und der Optischen Komponenten des Epson EB93....V
Abb. 26 Produktion des Innengehäuses und der Elektronischen Komponenten des Epson EB93....VI
Abb. 27 Produktion der Hauptplatine sowie EVG- und Netzfilterplatine des Epson EB93....VII
Abb. 28 Lebenszyklus eines durchschnittlichen Projektors....VIII
Abb. 29 Produktion der Hauptkomponenten eines durchschnittlichen Projektors....VIII
Abb. 30 Produktion des Gehäuses und der Optischen Komponenten eines durchschnittlichen Projektors....VIII
Abb. 31 Produktion des Innengehäuses und der Elektronischen Komponenten eines durchschnittlichen Projektors IX
Abb. 32 Produktion der Hauptplatine sowie EVG- und Netzfilterplatine eines durchschnittlichen Projektors X

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Technische Kennwerte der untersuchten Videoprojektoren 7
Tab. 2 Modellierung des Gebrauchsmusters bei der Nutzung....9
Tab. 3 Energieverbrauch der DUTs bei der Nutzung....9
Tab. 4 Modellierung der Energieeffizienz von Gebraucht- und Neugerät....10
Tab. 5 Gewichtsangaben der untersuchten Videoprojektoren....16
Tab. 6 Amortisationszeit der Herstellungsemissionen eines durchschnittlichen Projektors bei Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase....26
Tab. 7 Datensätze zur Modellierung der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse....29
Tab. 8 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario....30
Tab. 9 GWP-Entlastungspotenziale bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario....30
Tab. 10 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario....31
Tab. 11 GWP-Entlastungspotenziale bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zur Basis-Szenario....32
Tab. 12 Amortisationszeit bei Anpassung des Energieträgers und Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zur Basis-Szenario....33
Tab. 13 Gewichtsangaben und Energieeffizienz zum Zeitpunkt der Studie auf dem Markt erhältlicher Projektoren....IV
Tab. 14 Midpoint-Wirkungsindikatoren (absolut) für die Produktion der Komponenten [Epson EB93]. .XI
Tab. 15 Midpoint-Wirkungsindikatoren (relativ) für die Produktion der Komponenten [Epson EB93]. . .XII
Tab. 16 Midpoint-Wirkungsindikatoren (absolut) für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors....XIII
Tab. 17 Midpoint-Wirkungsindikatoren (relativ) für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors....XIV

Abkürzungen

AV	Audio/Video
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
DMD	Digital Mirror Device
DLP	Digital Light Processing
EuP	Energy using Products (energieverbrauchsrelevante Produkte)
eq.	Equivalent (Äquivalent)
fE	Funktionelle Einheit
GF	Glasfaser
HTPS	High Temperature Poly Silicon (polykrstallines Hochtemperatursilizium)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCD	Liquid Crystal Display (Flüssigkristallanzeige)
LCI	Life Cycle Inventory Analysis (Sachbilanz)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
LCP	Liquid Crystal Polymer (Flüssigkristallpolymer)
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
MLA	Microlens Array (Mikrolinsenarray)
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Polycarbonat
PP	Polypropylen
PPE	Polyphenylenether
PPS	Polyphenylensulfid
RoHS	Restriction of Hazardous Substances (Beschränkung gefährlicher Stoffe)
SMD	Surface Mount Device (oberflächenmontiertes Bauelement)
THT	Through Hole Technology (Durchsteckmontage)
TFT	Thin-Film Transistor (Dünnschichttransistor)
UHP Lamp	Ultra-High Performance Lamp
UHE Lamp	Ultra High Efficacy Lamp
UP	ungesättigtes Polyesterharz
WEEE	Waste of electrical and electronic equipment (Elektro- und Elektronikaltgeräte)
XGA	Extended Graphics Array (Bildauflösungs-Standard mit 1024 x 768 Bildpunkten)

1 Einleitung

There's a way to do it better...find it.
~ Thomas A. Edison

Die vorliegende Arbeit steht im Kontext eines Forschungsprojekts der Fachgebiete Audiokommunikation und -technologie sowie Sustainable Engineering der TU Berlin in Zusammenarbeit mit der ReBeam GmbH, einem auf Audio/Video-Technik spezialisierten Gebrauchtwarenhändler aus Berlin. Darin geht es um die produktbezogene Umweltbewertung von energiebetriebenen Kommunikationstechnologien. Im Rahmen der Arbeit wurden die Umweltauswirkungen bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines gebrauchten Videoprojektors im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts systematisch untersucht.

Die wichtigsten Umweltbelastungen elektronischer Produkte gemäß der europäischen Ökodesign-Richtlinie[1] sind die Materialanwendung, der Energieverbrauch und das Toxizitätspotenzial (vgl. Schischke & Griese, 2004; Fichter et al., 2009). 2007 betrug der Anteil der Sektoren IKT[2] und Unterhaltungselektronik weltweit 3 % an den Treibhausgasemissionen und 7,1 % am Stromverbrauch (Malmodin et al., 2010). Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten ist der aktuelle Diskurs über die Umweltauswirkungen energieverbrauchsrelevanter Produkte geprägt von einem Fokus auf die Steigerung der Energieeffizienz in der Nutzungsphase und einem damit einhergehenden Austausch verbrauchsintensiver Geräte zur Verminderung des Stromverbrauchs (Prakash et al., 2013). Doch nicht nur die Nutzung energiebetriebener Produkte, sondern auch die Herstellung ist mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. Produkte der IKT und Unterhaltungselektronik weisen als Elektro- und Elektronikgeräte eine komplexe Materialzusammensetzung mit einer hohen Anzahl verschiedener Metalle auf (Sander et al., 2012; Rotter et al., 2015). Aufgrund der hohen Innovationsgeschwindigkeit, kurzer Produktlebenszyklen und sinkender Preise nimmt die tatsächliche Nutzungsdauer von IKT-Produkten ab und führt zu einem sehr hohen Materialverbrauch im Vergleich zu anderen Gütern (Fichter et al., 2009; OECD, 2010; Prakash et al., 2012).

Die Tendenz der globalen Abfallmengen an Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) ist steigend (Ongondo & Williams, 2011). Da insbesondere kritische, d.h. ressourcenrelevante Metalle nur in geringen Mengen vorliegen, werden diese nach gegenwärtiger Praxis nur bedingt zurückgewonnen (Rotter et al., 2015). Infolgedessen soll die europäische WEEE-Richtlinie[3] einen Beitrag zur effizienten Ressourcennutzung und Rückgewinnung von wertvollen Sekundärrohstoffen leisten, „*indem vorrangig durch die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus durch Wiederverwendung, Recycling und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle die zu beseitigende Abfallmenge reduziert wird*“ (EU, 2012). Der werterhaltenden Rücknahme wird damit zwar eine höhere Priorität als der Verwertung eingeräumt, die gegenwärtige Sammlungs- und Transportpraxis erschwert jedoch eine Wiederverwendung. Vor allem durch

1 Rahmenrichtlinie 2009/125/EG zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (EU, 2009)

2 Informations- und Kommunikationstechnologie

3 Richtlinie 2012/19/EG zur Festlegung der Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (EU, 2012)

die Sammlung in Containern mit anschließender Schüttung werden noch funktionsfähige Altgeräte bzw. Bauteile beschädigt und sind oft nicht mehr wiederverwendbar (Griese et al., 2004; Walther et al., 2008; Broehl-Kerner et al., 2012, S. 17).

Studien für Notebooks haben bisher gezeigt, dass die potenziellen Umweltbelastungen durch Wiederverwendung reduzieren werden. Prakash et al. (2012) konstatierten, dass die Herstellungsphase mit knapp 56% bzw. 214 kg CO_2-eq. (Äquivalente) einen höheren Anteil an den Gesamttreibhausgasemissionen eines Notebooks hat als die Nutzungsphase. Scheumann & Becker (2014) zeigten in Ihrer Studie, dass die treibhausrelevanten Gesamtemissionen eines Notebooks durch Aufbereitung bei einer Erstnutzungsdauer von vier Jahren und einer Zweitnutzungsdauer von zwei Jahren um 73,5 kg CO_2-eq. gesenkt werden. Die durch die Herstellung eines energieeffizienteren Neugeräts verursachten Umweltbelastungen seien höher als die durch eine verlängerte Nutzungsphase ausgehende Belastung eines verbrauchsintensiven Altgeräts und erst nach einer Nutzungsdauer von ca. 16 Jahren kompensiert.

Die im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie durchgeführte EuP[4]-Studie über die Produktgruppe „Geräte zur Ton- und Bildbearbeitung“ ergab, dass bei Videoprojektoren die Nutzungsphase mit einer typischen Nutzungsdauer von 6 Jahren einen Großteil der Umweltauswirkungen ausmacht (AEA, 2010, S. Viii ff.). Der japanischen Typ-III- Umweltdeklaration EcoLeaf (JEMAI[5] nach ISO 14025) des LCD-Projektors EH-DM30 (Seiko Epson Corporation) zufolge, hat die Nutzungsphase mit 191,0 kg CO_2-eq. den größten Anteil an den Gesamttreibhausemissionen (247,2 kg CO_2-eq.) bei einer Nutzungsdauer von 5 Jahren[6], während die Herstellung nur 46,2 kg CO_2-eq. verursacht (JEMAI, 2010). Ressourcenrelevante Bauteile von Videoprojektoren sind vor allem Leiterplatinen und optoelektronische Komponenten (Sander et al., 2012).

Die Bewertung der umweltrelevanten Auswirkungen eines durchschnittlichen Videoprojektors im Vergleich zu einem energieeffizienteren Neugerät erfolgt mit der Methode der Ökobilanz. Die inhaltliche Gliederung der vorliegenden Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Zunächst werden die Grundlagen der Ökobilanz sowie Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie beschrieben (Kapitel 2), dann werden die Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz sowie Amortisationsanalyse dargestellt (Kapitel 3) und schließlich folgt eine Auswertung der Ergebnisse (Kapitel 4).

4 Energy using Products (energieverbrauchsrelevante Produkte)

5 Japan Environmental Management Association for Industry

6 Modellierung des Nutzungsmusters: 3,5 Stunden pro Tag; 100 Tage pro Jahr.

2 Methoden

2.1 Ökobilanz

Eine Ökobilanz (LCA - Life Cycle Assessment) gemäß der ISO-Norm[7] 14040 (2006, S. 7) ist die „*Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges*“. Die Ökobilanzierung ermöglicht eine systematische Bewertung der Umweltbelastungen von Produkten für alle Phasen des Lebenswegs, d.h. die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Fertigung, Nutzung, Entsorgung (Förtsch & Meinholz, 2015, S. 113). Bei der Ökobilanz werden alle Aspekte von menschlicher Gesundheit, natürlicher Umwelt und Ressourcen adressiert, ökonomische bzw. soziale Aspekte und Wirkungen liegen außerhalb des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz (ISO 14040, 2006, S. 14). Ökobilanz-Studien erfolgen nach ISO 14040 (2006) in vier Schritten (Abb. 1). Im folgenden werden die wesentlichen Bestandteile einer Ökobilanz-Studie dargestellt.

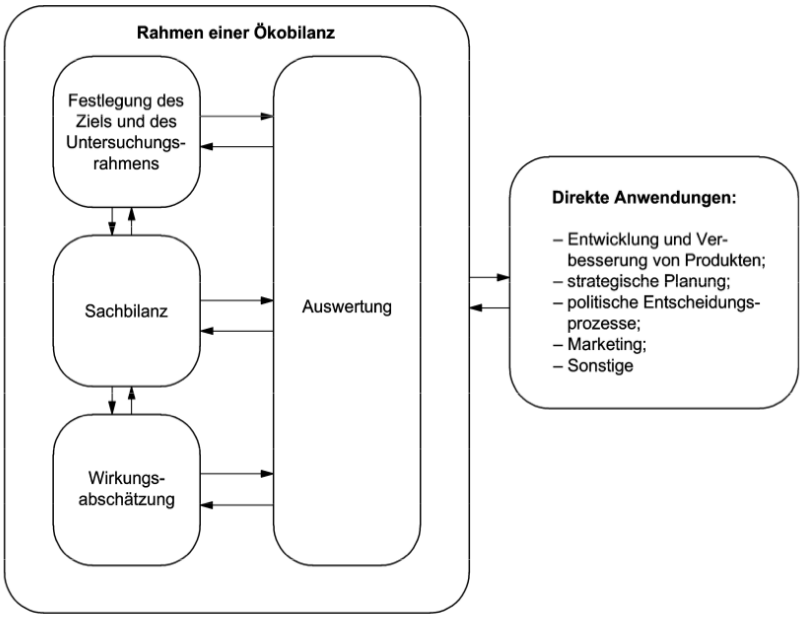

Abb. 1 - Wesentliche Bestandteile einer Ökobilanz [ISO 14040(2006)]

2.1.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die erste Phase der Ökobilanz dient der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (Goal and scope definition). In Abhängigkeit von der Zieldefinition erfolgt eine Beschreibung des Produktsystems für alle untersuchten Lebenswegabschnitte eines Produkts. Das Produktsystem wird unterteilt in Prozessmodule, welche durch Flüsse (von Zwischenprodukten, Produkt- und Elementarflüssen) miteinander verbunden sind. Elementarflüsse sind als Inputs von der Umwelt entnommene und dem Produktsystem zugeführte Stoffe (Ressourcen) bzw. als Outputs vom Produktsystem ausgehende Substanzen in Luft, Wasser und Boden (Emissionen). Die Input- und Output-

7 International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)

flüsse für jedes Prozessmodul sind in Bezug auf die zu definierende funktionelle Einheit zu quantifizieren. Die Systemgrenze legt die Prozessmodule fest, welche in das untersuchte System einzubeziehen sind (ISO 14040, 2006).

2.1.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz (LCI - Inventory Analysis) bildet die Datengrundlage zur Quantifizierung relevanter Eingangs- und Ausgangsgrößen des untersuchten Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges. Das Ergebnis der Sachbilanz ist eine Aufstellung der Inputs und Outputs eines Produkts in Bezug auf seine funktionelle Einheit.

Die Stoff- und Energieanalyse der Sachbilanz beruht weitgehend auf naturwissenschaftlichen Grundgesetzen (Klöpffer & Grahl, 2009, S. 64):

- Gesetz von der Erhaltung der Masse
- Gesetz von der Erhaltung der Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik)[8]
- Prinzip der Vermehrung der Entropie (2. Hauptsatz der Thermodynamik)
- Stöchiometrische Bilanz als Grundlage aller chemischen Reaktionsgleichungen
- $E = m\,c^2$ (Masse/Energie-Äquivalenz nach Einstein bei Kernenergie)

2.1.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung (LCIA - Impact Assessment) stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen her. Zunächst erfolgt eine Klassifizierung: Die Ergebnisse der Sachbilanz werden den Wirkungskategorien, d.h. den im Untersuchungsrahmen festgelegten Umweltthemen zugeordnet. Für die Wirkungskategorien erfolgt eine Charakterisierung, d.h. die Ergebnisse der Sachbilanz werden durch Wirkungsindikatorenwerte quantifiziert. Guinee et al. (2001, S. 21 ff.) betonen, dass die Methode der Wirkungsabschätzung nicht tatsächlich beobachtete, sondern potentielle Umweltwirkungen eines Produktsystems darstellen. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen über das Produktsystem und weiterhin bei einem Vergleich als relative Aussagen in Bezug auf die selektierten Alternativen zu betrachten.

Die Wirkungsabschätzung der Umweltthemen basiert auf Charakterisierungsmodellen. Zum Beispiel wird die Wirkungskategorie Klimawandel nach dem IPCC[9]-Model durch den Strahlungsantrieb (Radiative Forcing [$W\ m^{-2}$]) charakterisiert. Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für die Veränderung des Gleichgewichts zwischen einfallender Sonnenstrahlung und abgestrahlter Infrarotstrahlung innerhalb der Erdatmosphäre infolge von klimarelevanten Faktoren (IPCC, 2007). Zur Berechnung des Wirkungsindikators wird jedoch das Treibhauspotenzial (GWP - Global Warming Potential) unter Berücksichtigung temporaler und räumlicher Muster verwendet. Das GWP-Potenzial entspricht dem global gemittelten Strahlungsantrieb einer Substanz auf Massenbasis in Relation zum Strahlungsantrieb des Referenzgases Kohlenstoffdioxid (Co_2) über einen Zeithorizont (z.B. $GWP(H)_{100\ Jahre}$). Die Emissionen treibhausrelevanter Gase (z.B. Methan CH_4, Lachgas N_2O) werden unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Wirkung durch einen dimensionslosen Charakte-

8 Daher sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass elektrische Energie bzw. Strom physikalisch nicht *verbraucht*, sondern *umgewandelt* wird.

9 Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung)

risierungsfaktor (z.B. 25 für CH_4, 310 für N_2O) im Verhältnis zu Co_2 ermittelt und zu einem Indikatorergebnis [kg CO_2-Äquivalente] zusammengefasst (Klöpffer & Grahl, 2009, S. 265).

2.1.4 Auswertung

Bei der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung gemeinsam analysiert und in Bezug auf Ziel und Untersuchungsrahmen überprüft.

Bestandteile der Auswertung umfassen:

- die Identifizierung der signifikanten Parameter,
- Beurteilung der Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz
- Schlussfolgerungen, Empfehlungen

2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Studie ist die Quantifizierung der Umweltwirkungen, die sich im Produktlebenszyklus eines gebrauchten Videoprojektors im Rahmen seiner Lebensdauerverlängerung im Vergleich zum Ersatz durch ein energieeffizienteres Neugerät ergeben.

Im Rahmen dieser Studie soll ermittelt werden:

- Welche Komponenten haben den größten Anteil der potenziellen Umweltwirkung gemessen am Gesamtherstellungsaufwand eines durchschnittlichen Videoprojektors ?
- Wie hoch ist der Anteil der Lebenswegabschnitte am Gesamtlebenszyklus eines durchschnittlichen Projektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung?
- Ergibt sich ein Umweltentlastungspotenzial bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines gebrauchten Projektors oder bei Produktion und Nutzung eines energieeffizienteren Neugeräts?
- Wann amortisiert sich der Herstellungsaufwand eines Neugeräts durch eine erhöhte Energieeffizienz in der Nutzungsphase?

Ein Grund zur Durchführung des Forschungsprojekts ist die Erweiterung der Datenlage für energieverbrauchsrelevante Produkte im allgemeinen sowie die Verbesserung des aktuellen Forschungstands für die Produktkategorie Videoprojektor im Speziellen. Weiterhin sollen mithilfe der Ökobilanzierung die Umwelteffekte der Aufbereitung verbrauchsintensiver Gebrauchtgeräte gegenüber energieeffizienten Neugeräten systematisch erfasst werden für eine zuverlässige Verbrauchsempfehlung. Die Ergebnisse der Studie dient einer erhöhten Aussagesicherheit sowohl bei der Öffentlichkeitsarbeit des Unternehmens ReBeam für seine Aufbereitungstätigkeit als auch bei wissenschaftlichen Fragestellungen der Ressourcenschutzpotenziale elektronischer Produkte. Die Veröffentlichung einer Zusammenfassung der Studie ist in einer wissenschaftlichen Zeitschrift vorgesehen und befindet sich im Anhang. Ein kritisches Review wird intern durchgeführt.

Im folgenden wird das untersuchte Produktsystem und die zugrunde liegenden Annahmen beschrieben.

2.3 Funktionelle Einheit

> „*Ein Projektor ist ein netzbetriebenes, optisches Gerät zur Verarbeitung analoger bzw. digitaler Videobildinformation jedes Rundfunk-, Speicherungs- und Netzwerkformats, um eine Lichtquelle zu modulieren und das resultierende Bild auf eine externe Bildwand zu projizieren. Akustische Informationen in analogem bzw. digitalem Format können als eine optionale Funktion des Projektors verarbeitet werden*." (Ricardo-AEA, 2013, S. 4)

Bei Videoprojektoren erfolgt die Bildwiedergabe elektronischer Bildsignale durch Modulation einer Lichtquelle über ein optoelektronisches Lichtsteuerungssystem auf eine Leinwand in Abgrenzung zur direkten Reproduktion bei Bildschirmen. Die Polarisation des Lichts basiert entweder auf Transmission (LCD-Projektoren) bzw. Reflexion (DLP- und LCoS-Projektoren). Alle Projektionssysteme basieren auf einer hohen Intensität der Lichtquelle, welche typischerweise über 90% der Leistungsaufnahme eines Projektors ausmacht (AEA, 2010, S. 6). Eine gute Übersicht der technologischen Entwicklung von Projektions-Systemen seit den 1930er Jahren findet sich bei Webers (2011) sowie Hornbeck (1998).

Die funktionelle Einheit (fE) ist ein Videoprojektor (ugs. Beamer) für die untersuchte Nutzungszeit bzw. 3500 Stunden (h) projizierte Videosignale im Normal-Modus[10] und 10500 h Bereitschaftsbetrieb im Standby-Modus[11] (Abb. 2-4). Die Funktion spiegelt die geforderten Gebrauchseigenschaften wieder und soll für alle untersuchten Varianten gleich sein.

Abb. 2 - NEC NP400 [NEC, 2009]

Abb. 3 - Sanyo PLC-XD2200 [Sanyo, 2010]

Abb. 4 - Epson EB-93e [Seiko Epson, 2011]

10 Entspricht einem angeschalteten Zustand der Lichtquelle bei Betriebsspannung zur Bildwiedergabe bei Standardeinstellung der Helligkeit (default brightness).

11 Entspricht einem ausgeschalteten Zustand der Lichtquelle sowie Lüfter bei Anschluss an einer Stromquelle.

Das europäische Marktvolumen (EU-27) von Projektoren wird dominiert von Produkten mit einer Helligkeit von 2000-4000 ANSI Lumen (lm) bei XGA-Auflösung und einer durchschnittlichen Energieeffizienz von 0,13 W/lm (AEA, 2010, S. 199). Dementsprechend wurden die drei untersuchten Gebrauchtgeräte (DUT - Devices under Test) ausgewählt, welche außerdem typische LCD-Projektoren für den Bildungsbereich aus dem mittleren Preissegment repräsentieren (Tab. 1).

Tab. 1 - Technische Kennwerte der untersuchten Videoprojektoren nach Angaben des Herstellers

DUT		**NEC NP400**[12]	**Sanyo PLC-XD2200**[13]	**Epson EB-93e**[14]
Baujahr		2008	2010	2011
Projektionstechnologie		3 x 1,6 cm (0,63") LCD-Panel	3 x 1,4 cm (0.55") LCD-Panel	3 × 1.4 cm (0.55“) LCD-Panel
Helligkeit [ANSI-Lumen]		2600	2200	2400
Auflösung		XGA – 1024 × 768	XGA – 1024 × 768	XGA – 1024 × 768
Leistung	**Normal-Modus [W]**	295	210	299
	Eco-Modus [W]	240	181	254
	Standby-Modus [W]	11	0,7	0,4
Lampe		NP07LP	POA-LMP142	ELPLP60
Lampen-Typ		UHP	UHP	UHE E-TORL
Lampenleistung [W]		210	215	200
Lampenlebensdauer	**Normal-Modus [h]**	3000	4000	5000
	Eco-Modus [h]	4000	6000	6000
Betriebsgeräusch	**Normal-Modus [dB]**	35	34	33
	Eco-Modus [dB]	29	29	28
Lautsprecherleistung [W]		7 (Mono)	1 (Mono)	16
Garantie	**Gerät**	3 Jahre	3 Jahre	3 Jahre
	Lampe	6 Monate (max. 1000 h)	1 Jahr (max. 2000 h)	3 Jahre
Abmessung [cm]		30,8 x 9,3 x 26,2	334, x 9,4 x 24,7	34,5 x 9,3 x 26,3
Gewicht [kg]		3,0	2,6	3,1

2.4 Produktsystem

Die Lebenszyklusanalyse erfolgt für die Produktion, Nutzung und Entsorgung (cradle to grave - von der Wiege bis zur Bahre) eines Videoprojektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung (Abb. 5)[15]. Für das Produktsystem wird angenommen, dass die bei der Herstellung verwendeten Ressourcen aus Primärrohstoffen bestehen. Durch Aufbereitung von Gebrauchtgeräten können Herstellungsemissionen bei der Primärgewinnung (Rohstoffabbau, Fertigung der Vorprodukte, Transporte, etc.) vermieden werden. In der Ökobilanzierung stellt diese Vermeidung des Herstellungsaufwands eine outputorientierte Substitution der Primärrohstoffe dar und wird als Gutschrift anerkannt[16] (vgl. Ligthart & Ansems, 2012).
Weiterhin erfolgt die Bilanzierung unter der Annahme, dass die fE nach Erstnutzung einem

12 Für weitere Informationen siehe: http://www.projectorcentral.com/NEC-NP400.htm [Zugriff 27.07.2015]

13 Für weitere Informationen siehe: http://www.projectorcentral.com/Sanyo-PLC-XD2200.htm [Zugriff 27.07.2015]

14 Für weitere Informationen siehe: http://www.projectorcentral.com/Epson_Europe-EB-93e.htm [Zugriff 27.07.2015]

15 Diese Prozessmodule stellen das Vordergrundsystem, d.h. die für das untersuchte Produktsystem spezifische Prozesse, dar.

16 Siehe Abschnitt 2.4.3 und 2.6

defekten Altgerät entspricht. Für eine vergleichende Bilanzierung wurde ein Szenario aus der Sicht eines potenziellen Kunden von ReBeam modelliert, bei dem dieser nach Erstnutzung vor der Entscheidung steht zwischen der Aufbereitung, d.h. für die Verlängerung der Nutzungsdauer eines bereits produzierten Gebrauchtgeräts, oder dem Ersatz, d.h. für die Produktion sowie Nutzung eines energieeffizienteren Neugeräts. Um die umweltrelevanten Wirkungen der Wiederverwendung eines verbrauchsintensiven Gebrauchtgeräts gegenüber dem Herstellungsaufwand eines energieeffizienteren Neugeräten zu verdeutlichen, wurden in der vergleichenden Bilanzierung bei der Nutzung nur die sich aus der 2. Nutzung ergebenden Belastungspotenziale berücksichtigt.

Die verwendete Software GaBi (Version 6.0) von PE International ermöglicht eine Modellierung des Produktsystems in Übereinstimmung mit dem ISO (2006) und ILCD[17] Referenzsystem (EC, 2010). Die Ökobilanz-Datenbank (Version 2014) enthält umfangreiche Datensätze für die Verarbeitungsverfahren, Materialherstellung und den Energieaufwand des untersuchten Produktsystems (Baitz et al., 2014).

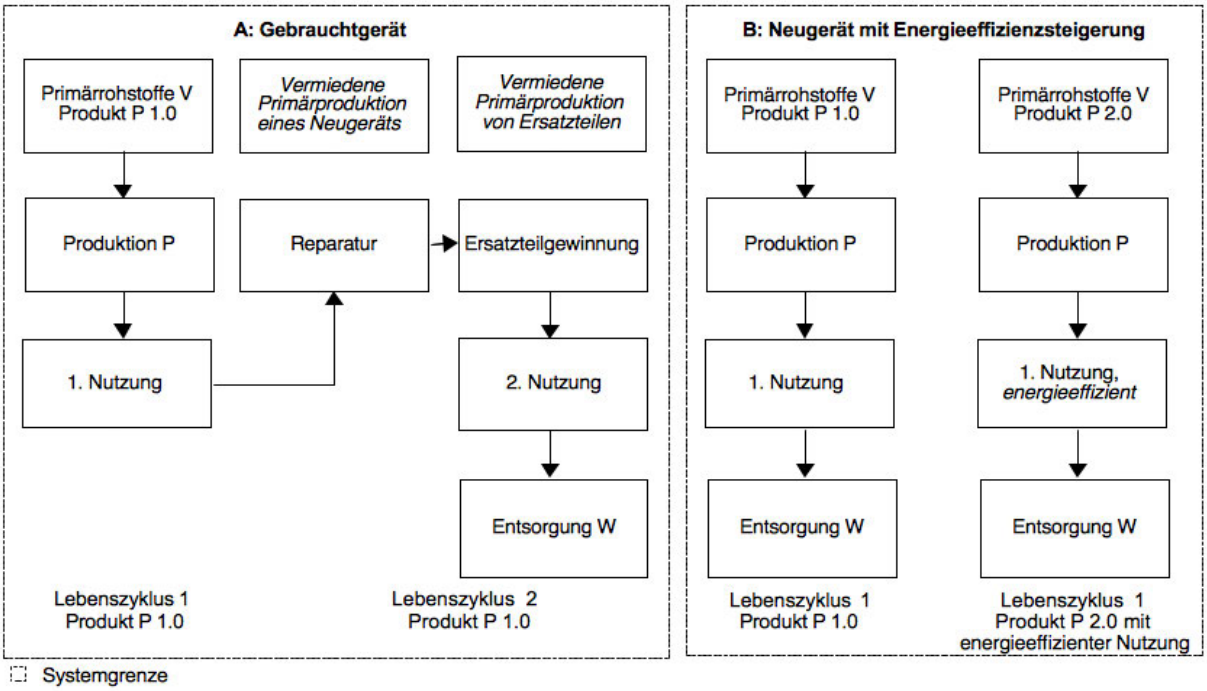

Abb. 5 - Prozessfließbild des untersuchten Produktsystems

2.4.1 Produktion

Die Standorte für die Herstellung und Fertigung der Komponenten der auf dem europäischen Markt gehandelten Projektoren befinden sich vorwiegend in China (AEA, 2010, S. 59). Als Datengrundlage zur Modellierung des Herstellungsaufwands dienten eigene Messungen der Materialzusammensetzung von gebrauchten Projektoren. Mit den Gewichtsangaben der Haupt- und Subkomponenten von drei Projektoren wurde die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts ermittelt.

Zur vergleichenden Bilanzierung von Gebraucht- und Neugerät wurden zunächst die Gewichts- und Leistungsangaben zum Zeitpunkt der Erhebung auf dem Markt erhältlicher Projektoren für den Bildungs- und Officebereich ermittelt (siehe Anhang). Für den durchgeführten Vergleich wurde

17 The International Reference Life Cycle Data System

jedoch ausgehend von der Datengrundlage eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts ein generisches Neugerät mit einer erhöhten Energieeffizienz von 5% bzw. 10% verwendet. Die vergleichende Bilanzierung erfolgt damit unter der Annahme, dass die Produktionsemissionen von Gebraucht- und Neugerät gleich sind. Da die für Projektoren wesentlichen Konstruktionen des optischen Lichtwegs, der Lampen- sowie Projektionstechnologien sehr gut etabliert sind, werden neue Modelle ohne signifikante Änderungen der Herstellungsprozesse für das mittlere Preissegment mit dem größten Marktvolumen produziert (AEA, 2010, S. 75). Weiterhin haben Prakash et al. (2013) für Notebooks gezeigt, dass die Unterschiede zwischen den Produktionsprozessen bei unterschiedlichen Produktgenerationen kleiner sind als die Datenunsicherheiten und somit vernachlässigt werden können.

2.4.2 Nutzung

Für die Erhebung des gesamten Produktlebenszyklus eines Projektors bei Wiederverwendung wurde eine Nutzung in Europa mit einer Erst- und Zweitnutzungsphase modelliert. Die 1. Nutzungsdauer wurde entsprechend dem typischen Zustand der angekauften Gebrauchtgeräte von ReBeam bei Wareneingang auf fünf Jahre geschätzt. Die 2. Nutzungsdauer beträgt zwei Jahre und entspricht der allgemeinen Gewährleistungsfrist in der EU beim Verbrauchsgüterverkauf (EU, 1999). Für die Modellierung der Nutzungsphase wurde ein für Schulprojektoren typisches Gebrauchsmuster (vgl. AEA, 2010) zugrunde gelegt (Tab. 2). Aus dem Gebrauchsmuster bei der Nutzung und den Leistungsangaben der Datenblätter ergibt sich der untersuchte Stromverbrauch bei der Nutzung (Tab. 3).

Tab. 2 - Modellierung des Gebrauchsmusters bei der Nutzung

1. Nutzung [Jahre]		5
2. Nutzung [Jahre]		2
Tage der Nutzung pro Jahr [d]		250
Nutzungsdauer pro Tag [h]	**Normal-Modus**[18]	2
	Standby-Modus	6
Nutzungsdauer pro Jahr [h]	**Normal-Modus**	500
	Standby-Modus	1500

Tab. 3 - Energieverbrauch der DUTs bei der Nutzung

Stromverbrauch pro Jahr	**NEC NP400**	**Sanyo PLC-XD2200**	**Epson EB-93e**	**Durchschnitt Ø**
Normal-Modus [kWh/Jahr]	147,5	105	149,5	134
Standby-Modus [kWh/Jahr]	16,5	1,05	0,6	6,05

Der Vergleich von Gebraucht- und Neugerät erfolgt bei der Nutzung nur für die 2. Nutzung unter der Annahme, dass die fE nach 1. Nutzung entweder aufbereitet und wiederverwendet oder durch Produktion und Nutzung eines energieeffizienteren Neugeräts ersetzt wird. Ausgehend von der Datengrundlage eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts wurde ein generisches Neugerät mit einer höheren Energieeffizienz von 5% bzw. 10% im Normal-Modus und 0,5 W im Standby-Modus

18 Der Normal-Modus entspricht der Standardeinstellung.

modelliert (Tab. 4). Die mit der 1. Nutzung verbundenen Umweltwirkungen wurden beim Vergleich nicht berücksichtigt, um die umweltrelevanten Wirkungen von Herstellungsaufwand im Vergleich zur Nutzungsphase bei gleicher Nutzungsdauer von Gebraucht- und Neugerät zu quantifizieren.

Tab. 4 - Modellierung der Energieeffizienz von Gebraucht- und Neugerät

Energieeffizienz	**NEC NP 400**	**Sanyo PLC-XD2200**	**Epson EB 93**	**Gebrauchtgerät Durchschnitt (Ø)**	**Neugerät (5%)**	**Neugerät (10%)**
Lichtstrom [lm]	2600	2200	2400	2400	2400	2400
Leistung Standby [W]	11	0,7	0,4	4,0	0,5	0,5
Leistung Normal [W]	295	210	299	268	252	240
Energieeffizienz [W/lm]	0,113	0,095	0,125	0,111	0,105	0,100

2.4.3 Aufbereitung durch ReBeam

Das auf Audio/Video-Technik spezialisierte Unternehmen ReBeam mit seinem Standort in Berlin kauft gebrauchte Projektoren aus ganz Europa von Privatpersonen, kommerziellen Anbietern sowie direkt vom Hersteller (Abb. 6). Bei vielen Geräten handelt es sich um Demogeräte oder Garantie- und Austauschware[19]. Etwa 60 % aller Wareneingänge sind funktionsfähig und werden nach Reinigung direkt weiter verkauft (Instandhaltung), ca. 40 % sind defekt und werden professionell aufgearbeitet (Refurbishment). Die Wiedervermarktung erfolgt unter Gewährleistung europaweit mit einem großen Marktanteil in Deutschland.

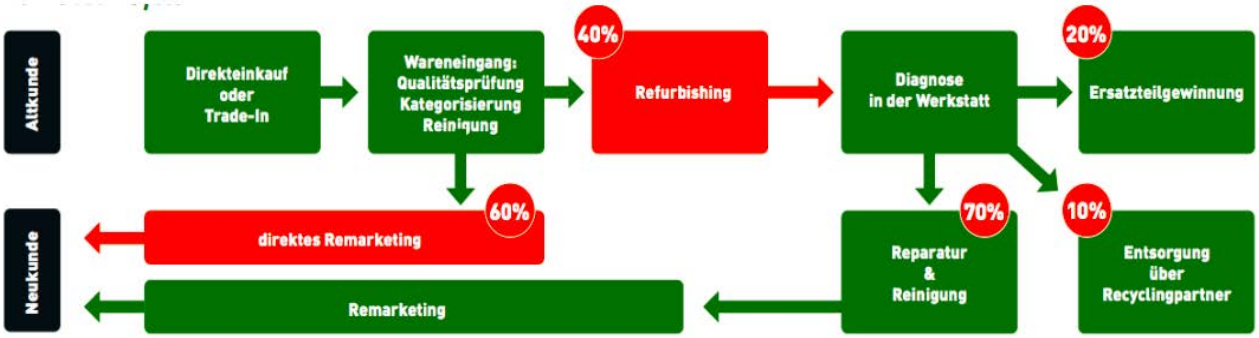

Abb. 6 - Rebeam [ReBeam, 2014]

Die Aufbereitung zum Wiederverkauf (Refurbishment) umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Überprüfung des Gerätezustands bei Wareneingang
- Demontage
- Reinigung des optischen Kanals
- Reparatur defekter Bauteilen (bis auf Bauteilebene Chiplevel)
- Montage
- Qualitätskontrolle bei Warenausgang

19 Weitere Informationen siehe: https://www.rebeam-shop.com/de/faqs [Zugriff 27.07.2015]

Die Aufbereitung zur Ersatzteilgewinnung dient der Gewinnung von funktionsfähigen Bauteilen für die Reparatur anderer Geräte und umfasst typischerweise folgende Bauteile:

- Steuerungsmodule: Haupt-, Elektronische Vorschaltgerät- (EVG-) und Netzfilterplatinen
- Bildverarbeitungskomponenten (LCD-Panels, DLP-Chips)
- Projektionsoptik: Polarisationsfilter, Linsen
- Zubehör: externes Netzteil, Fernbedienung

Zur Modellierung des Aufwands für die Aufbereitung wurde der elektrische und thermische Energieverbrauch (Strom- und Heizverbrauch in der Werkstatt) bei einem durchschnittlichen Zeitaufwand von 2,5 h für die Reparatur bzw. 0,5 h für die Ersatzteilgewinnung eines Projektors berechnet. Durch die Aufbereitungstätigkeit von ReBeam entstehen aus drei defekten Altgeräten zwei funktionsfähige Gebrauchtgeräte zur Wiederverwendung. Unter der Annahme, dass die fE nach Erstnutzung einem defekten Altgerät entspricht, kann mit 1 defekten Altgerät 2/3 eines Gebrauchtgeräts repariert werden. Damit ergibt sich in der Ökobilanzierung bei der Reparatur eines defekten Altgeräts eine Gutschrift von 67% für die vermiedenen Primärrohstoffe bei der Herstellung eines Neugeräts. Bei der Ersatzteilgewinnung ergibt sich durch die Gewinnung funktionsfähiger Bauteile eine weitere Gutschrift von 20% für die vermiedenen Primärrohstoffe bei der Produktion neuer Ersatzteile. Für den bei der Ersatzteilgewinnung entstehenden Abfallrest von 13% wurde eine stoffliche Verwertung von Metallen und thermische Verwertung von Kunststoffen modelliert.

2.4.4 Entsorgung

Die Entsorgungsphase entspricht einer endgültigen Verwertung eines Gebrauchtgeräts nach der 2. Nutzung mit einer stofflichen Verwertung von Metallen sowie thermischen Verwertung von Kunststoff. Theoretisch sind mehr als die zwei hier betrachteten Nutzungsphasen möglich, bevor die Projektoren endgültig entsorgt werden. Weitere Nutzungsphasen nach der 2. Nutzung wurden jedoch nicht berücksichtigt.

2.4.5 Transporte

Entsprechend der Standorte wurden folgende Transportdistanzen modelliert:

- 21000 km (Schiff) und 1000 km (LKW-Zug) von der Produktion (China) zur 1. Nutzung (EU)
- 5000 km (LKW-Zug) von der 1. Nutzung zur Aufbereitung (Deutschland)
- 1000 km (LKW-Zug) von der Aufbereitung zur 2. Nutzung (EU[20])
- 100 km (LKW-Zug) von der 2. Nutzung zur endgültigen Entsorgung (Deutschland)

Die Transporte wurden dem jeweils vorangehenden Prozessmodul zugeordnet.

20 Diese Transportstrecke reflektiert den Schwerpunkt des Wiederverkaufs von ReBeam in Deutschland. Für eine bessere Vergleichbarkeit von Erst-und Zweitnutzung wurde im Basisszenario ein europaspezifischer Strommix modelliert und in der Sensitivitätsanalyse ein deutscher Strommix verwendet.

2.5 Systemgrenzen und Abschneidekriterien

Für den Produktionsaufwand der Projektoren wurde die Materialzusammensetzung folgender Komponenten untersucht:

- Gehäusekomponenten
- Steuerungsmodul
- Projektionsoptik
- Bildverarbeitungskomponenten
- Lichtquelle
- Belüftungskomponenten

Die nicht berücksichtigten Aspekte sind im Folgenden beschrieben:

- Die Verpackung, Fernbedienung sowie das externe Netzteil wurden bei der Komponentenanalyse nicht erfasst.
- Unterschiedliche Spezifikationen und Zusatzfunktionen des neuen Projektors wurden nicht adressiert.
- Herstellung und Entsorgung der Infrastrukturen (z.B. Verkehrsnetz) sowie Investitionsgüter (z.B. Produktionsanlagen oder Verkehrsmittel) sind außerhalb des Untersuchungsrahmens.
- Die Untersuchung der umweltrelevanten Wirkungen erfolgt zwar bei Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus, jedoch ohne vollständige Auswertung aller Umweltkategorien der verwendeten ReCiPe 2008 Methode[21].
- Weitere als die zwei hier betrachteten Nutzungsphasen sind theoretisch möglich, wurden jedoch nicht berücksichtigt.

Als Abschneidekriterium wurde die 1%- und die 5%-Regel auf Prozessebene der Hauptkomponenten angewendet, d.h. Inputmaterialien des Produktsystems, welche im jeweiligen Teilprozess des Lebensweges kleiner als 1 % der Masse des gewünschten Outputs sind, werden nicht berücksichtigt, dürfen in der Summe aber nicht mehr als 5 % ergeben.

Elektronische Produkte sind in Bezug auf ihre Materialzusammensetzung komplex und stellen durch fortschreitende Miniaturisierung der signalverarbeitenden Halbleiter im Micro- und Nanobereich eine Herausforderung bei der Ökobilanzierung dar (vgl. Schichke, & Griese, 2004; Müller & Griese, 2007). Daher wurde ein Abschneidekriterium bei der Bilanzierung der elektronischen Subkomponenten von 0,4% (entsprechend der Summe von 3 LCD-Panels) definiert. Die elektronischen Baugruppenelemente der Leiterplatten wurden mithilfe eines parametrisierte Prozessplans der GaBi-Software nach Masse und Dimension in Bezug auf ihre Funktion, Gehäuse und Montagetechnologie (SMD bzw. THT) modelliert. Für die Analyse der Hauptplatine wurden alle Baugruppenelemente mit einer Fläche größer als 1,5 x 0,76 mm (entsprechend der Fläche eines SMD-Kondensators) ausgewertet.

2.6 Allokationsverfahren

Allokationen stellen eine Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses zum untersuchten Produktsystem dar (ISO 14040, 2006, S. 10). Für die Aufbereitung und Wiederverwen-

21 Siehe Abschnitt 2.8

dung bzw. Gutschriftenverteilung erfolgt eine Allokation durch outputorientierte Substitution[22]. Dieses Allokationsverfahren basiert auf dem Ersatz von Primärrohstoffen durch die beim Wiederverwertungsprozess (Recycling) sich ergebenden Sekundärmaterialien und damit eingehenden vermiedenen Herstellungsemissionen (Abb. 7). Weitere Allokationen im modellierten Vordergrundsystem wurden nicht vorgenommen. Allokationen im Hintergrundsystem sind der Dokumentation der GaBI-Datenbank zu entnehmen (Baitz et al., 2014).

Da in der Studie ein Fokus im Vergleich von umweltrelevanten Erstnutzung und Zweitnutzung besteht, wurde der Wiederverwertungsprozess im untersuchten Produktsystem nach Zweitnutzung abgeschnitten.

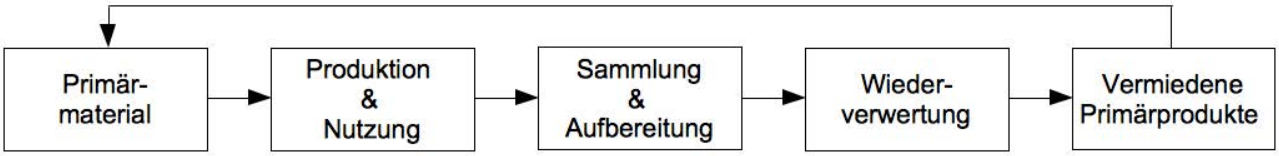

Abb. 7 - Allokationsverfahren der outputorientierten Substitution (nach Lighardt & Ansems, 2012)

2.7 Datenqualität

Die Datengrundlage bestehen aus Primärdaten, d.h. eigene Messungen der Gewichtsangaben der Komponenten und firmenspezifische Daten der ReBeam GmbH, sowie Sekundärdaten, d.h. wissenschaftliche Literatur und Herstellerangaben. Die Datensätze für den Energie- und Wasserverbrauch sowie die Ausgangsrohstoffe wurden der Ökobilanz-Datenbank (2014) entnommen.

Der geographische Bezugsraum des betrachteten Produktsystems umfasst die Herstellung in China, die Nutzung in Europa sowie die Aufarbeitung und Entsorgung in Deutschland. Die Verarbeitungsprozesse der thermischen und elektrischen Energiebereitstellung wurden entsprechend des geographischen Bezugs regionalspezifisch modelliert. Für den Vergleich von gebrauchten und neuen Videoprojektoren gilt ein Zeitbezug von 2008 bis 2014. Die untersuchten Gebrauchtgeräte stellen typische LCD-Projektoren für den Bildungsbereich aus den Baujahren zwischen 2008 bis 2011 dar. Die verwendeten Prozessdaten der GaBi-Datenbank (2014) repräsentieren ausschließlich valide Datensätze (gültig bis min. 2014). Die Revision der Referenzjahre reicht von 2011 bis 2013[23]. Weiterhin repräsentiert das auf auf HTPS[24]- Halbleitern basierende LCD-Projektionssystem den aktuellen Stand der Technik mit einem großen Marktanteil in der EU-27 neben DLP[25]- und LCoS[26]-Halbleitertechnologien (AEA, 2010).

Datenlücken bei den Primärdaten bestanden bei der projektorenspezifischen Modellierung der Gasentladungslampe und wurden durch Literaturangaben geschlossen: Der Quecksilbergehalt in Projektorenlampen ist abhängig von der Leistung sowie Lampentyp und beträgt bei Metallhalogenidlampen zwischen 4 - 100 mg bzw. ca. 30 mg bei einer 250 Watt Lampe (Sperlich et al., 2014, S.13). Statt einer für Projektoren typischen Hochdrucklampe wurde eine in der GaBi-Datenbank verfügbare T5-Niederdruckleuchstofflampe mit einem Quecksilbergehalt von 30 mg für alle DUTs

22 Für die konkrete Gutschriftenverteilung siehe Abschnitt 2.4.3

23 Für die weitere Informationen zur Dokumentation der Gabi-Datenbank (2014) siehe: http://www.gabi-software.com/deutsch/support/gabi/gabi-database-2014-lci-documentation/ [Zugriff 27.07.2015]

24 High Temperature Poly Silicon

25 Digital Micromirror Device

26 Liquid Crystal on Silicon

sowie einem Sicherheitsaufschlag von +10% bezogen auf das Glaskolben-Gewicht modelliert.

2.8 Methoden der Wirkungsabschätzung

Die in der vorliegenden Studie verwendete ReCiPe 2008 Methode zur Wirkungsabschätzung ermöglicht eine kombinierte Auswertung der Ergebnisse mit der CML-2001 Methode sowie der Eco-Indicator 99 Methode (Goedkoop et al., 2013, S. ii ff.) Bei der CML-2001 Methode erfolgt die Wirkungsabschätzung auf midpoint-Ebene, d.h. in der Mitte der Wirkungskette. Die problemorientierten midpoint-Wirkungsindiaktorenergebnisse haben den Vorteil einer höheren Datensicherheit und enthalten keine Normierung bzw. Gewichtung. Bei der Eco-indicator 99 Methode werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf endpoint-Ebene, d.h. am Ende der Wirkungskette betrachtet. Die Ergebnisse der endpoint-Wirkungsindikatoren werden mit schadensbasierter Gewichtung ermittelt und haben eine größere Umweltrelevanz (vgl. Guinée et al., 2001, S. 142). Die zur Ermittlung der Herstellungsemissionen berücksichtigten Wirkungskategorien der ReCiPe Methode 2008 sind in der Abbildung 8 dargestellt.

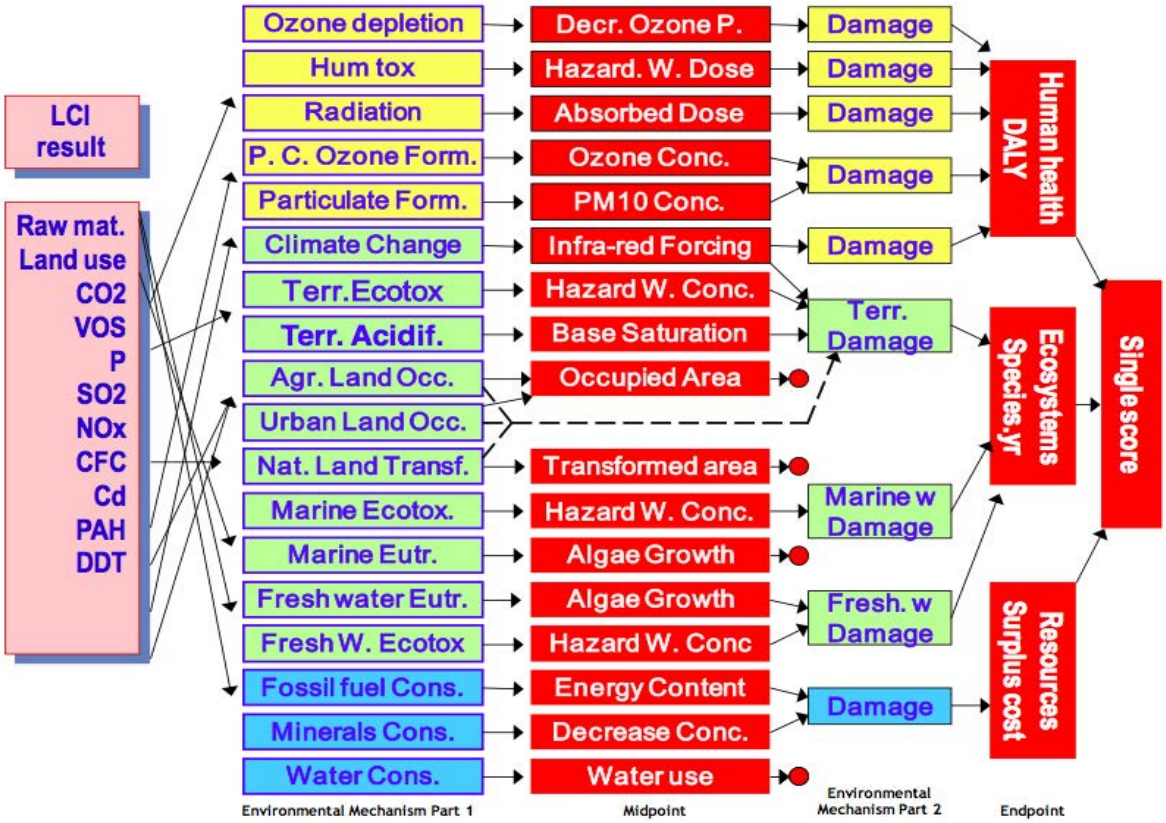

Abb. 8 - Midpoint- und Endpoint-Ansatz der ReCiPe 2008-Methode [Goedkoop et al., 2013]

Die Wirkungsabschätzung erfolgt ausschließlich mit der ReCiPe 2008 Methode, da die sich durch die Methodenauswahl ergebenden methodischen Unsicherheiten im Rahmen dieser Studie nicht adressiert werden. Die Auswertung erfolgt mit einem Fokus auf den Klimawandel, den Metallverbrauch sowie den kumulierten Energieaufwand. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) bzw.

Primärenergiebedarf eines Produktsystems ergibt sich aus dem Heizwert[27] der energetischen Ressourcen sowie den Wirkungsgraden der Konversions- und Produktionsprozesse in der Energiebereitstellungskette. Bei der umweltrelevanten Bewertung des KEA ist die Unterscheidung von erneuerbaren und nicht erneuerbaren (fossilen) Energieträgern relevant.

2.9 Berechnung der Amortisationszeit

Für die Bilanzierung wurde angenommen, dass neue Produktgenerationen energieeffizienter sind als ihre Vorgängermodelle. Daraus ergibt sich bei der Nutzung ein Einsparpotenzial von Neugeräten gegenüber verbrauchsintensiveren Gebrauchtgeräten in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer. Die Amortisationszeit ist hier die notwendige Zeitdauer t in Jahren, um die umweltrelevanten Herstellungsemissionen durch Steigerung der Energieeffizienz bei der Nutzung zu kompensieren. Mithilfe der Amortisationszeit kann somit berechnet werden, wie lange die Nutzung eines verbrauchsintensiveren Geräts bzw. ab welchem Zeitpunkt der Herstellungsaufwand eines energieeffizienteren Modells ein höheres Umweltentlastungspotenzial im Vergleich zur Alternative darstellt.

Die Berechnung des Einsparpotenzials und der Amortisationszeit erfolgt für die Wirkungskategorie Klimawandel:

$$GWP_{Einsparpotenzial\ pro\ Jahr} = GWP_{Nutzung\ Gebrauchtgerät} - GWP_{Nutzung\ Neugerät} \quad (1)$$

$$t_{Amortisationszeit} = \frac{GWP_{Produktion}}{GWP_{Einsparpotenzial}} \quad (2)$$

Aus der Formel (2) wird ersichtlich: Je höher das GWP-Einsparpotenzial und damit die Energieeffizienzsteigerung ist, desto kürzer ist die Amortisationszeit.

27 In dieser Studie wurde der obere Heizwert verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Sachbilanz

Zur Quantifizierung potenzieller Umweltauswirkungen eines durchschnittlichen Videoprojektors wurde die Materialzusammensetzung von drei Projektoren auf der Grundlage von Primärdaten ermittelt. Die folgende Tabelle 5 zeigt die Gewichtsangaben als Datengrundlage für die Modellierung eines durchschnittlichen Projektors[28]. Weiterhin wurde für die elektronischen Komponenten inklusive Leiterplatten ein durchschnittlicher Gehalt in Höhe von 214,7 g an Kupfer und je 0,2 g an Silber und Gold ermittelt.

Tab. 5 - Gewichtsangaben der untersuchten Videoprojektoren

Komponenten		Epson EB93 [kg / fE]	Sanyo PLC-XD220 [kg / fE]	NEC NP400 [kg / fE]	Durchschnitt Ø [kg / fE]	Anteil Ø [% / fE]
Gesamtgewicht		3.027	2.599	2.887	2.838	100
Plastik [1-8]		1.658	1.207	1.359	1.408	49.6
Metalle [9-10]		0.247	0.204	0.243	0.231	8.2
Optische Komponenten [11-12]		0.267	0.262	0.259	0.263	9.3
Elektronische Komponenten [13-19]		0.855	0.926	1.081	0.936	33.0
1	**PC+ABS**	0.830	-	0.860	0.563	19.9
2	**PC**	0.194	0.819	0.083	0.365	12.9
3	**PPS**	0.209	0.132	0.179	0.173	6.1
4	**UP GF**	0.191	0.170	0.138	0.166	5.9
5	**PPE**	0.162	0.086	0.093	0.114	4.0
6	**LCP GF**	0.060	-	-	0.020	0.7
7	**ABS**	0.006	-	-	0.002	0.1
8	**PP**	0.006	-	-	0.002	0.1
9	**Aluminiumblech AlMg 2.5**	0.155	0.144	0.187	0.162	5.7
10	**Stahlblech**	0.092	0.060	0.056	0.069	2.4
11	**Linsen**	0.216	0.177	0.190	0.194	6.8
12	**Gasentladungslampe**	0.051	0.085	0.069	0.068	2.4
13	**Bestückte Leiterplatten**	0.369	0.556	0.559	0.495	17.4
14	**Lüfter**	0.281	0.246	0.237	0.255	9.0
15	**Schrauben**	0.041	0.036	0.068	0.048	1.7
16	**Lautsprecher**	0.089	0.009	0.035	0.044	1.6
17	**Kabel**	0.053	0.037	0.050	0.047	1.6
18	**Stecker**	0.010	0.030	0.064	0.035	1.2
19	**LCD-Panels**	0.012	0.012	0.013	0.012	0.4

3.2 Wirkungsabschätzung

3.2.1 Produktionsaufwand der Komponenten

Zur Quantifizierung des Produktionsaufwands wurden die prozentualen Beiträge der Projektoren-Komponenten am Gesamtherstellungsaufwand für die gemäß der ReCiPe 2008 Methode berück-

28 Die Sachbilanz der bestückten Leiterplatten sind dokumentiert und können bei Bedarf nachgereicht werden.

sichtigten 18 midpoint-Wirkungskategorien sowie 3 endpoint-Wirkungskategorien bei einem betrachteten Zeithorizont von 100 Jahren ermittelt.

Die folgenden Abbildungen 9 und 10 zeigen die Ergebnisse der midpoint-Umweltindikatoren bei der Produktion der Hauptkomponenten des Gerätetyps Epson EB93 (Abb. 9) sowie eines durchschnittlichen Videoprojektors (n=3; Abb. 10). Da die Ergebnisse für den untersuchten Gerätetyp Epson EB93 im Vergleich zu einem durchschnittlichen Projektor sehr ähnlich sind, werden die folgenden Ergebnisse in Bezug auf einen durchschnittlichen Projektor zusammengefasst. Aus den Abbildungen 9 und 10 wird bereits ersichtlich, dass die elektronischen Komponenten inklusive der bestückten Leiterplatten mit Ausnahme der Kategorie Ozonabbau in allen Wirkungskategorien den größten Anteil am durchschnittlichen Gesamtherstellungsaufwand haben. Der Anteil der elektronischen Komponenten eines durchschnittlichen Videoprojektors am Gesamtproduktionsaufwand beträgt je nach betrachteter Wirkungskategorie mindestens 70,0% für den Wasserverbrauch, 81,8 % für den Klimawandel und maximal 98,4% für den Metallverbrauch[29].

Weiterhin zeigen die Abbildungen 11 und 12 der midpoint-Umweltindikatorenergebnisse den Herstellungsaufwand der Subkomponenten für den Gerätetyp Epson EB 93 (Abb. 11) sowie für einen durchschnittlichen Videoprojektors (Abb. 12) im Detail. Die absoluten Beiträge der Subkomponenten am Produktionsaufwand im Detail befinden sich als Tabelle im Anhang. Die Integrierten Schaltungen tragen für 8 Wirkungskategorien den größten Anteil zum durchschnittlichen Gesamtproduktionsaufwand bei (GWP: 56,2%; IRP: 60,4 %; PMFP: 49,8%; POFP: 49,8%; TAP: 56,4%; MEP: 39,3%; FDP: 54,3%; WDP: 44,1%)[30]. Die unbestückten Leiterplatten haben für 4 Wirkungskategorien den größten Beitrag (HTP: 32,4%; TETP: 25,5%; ALOP: 33,9%; MDP: 37,4%)[25]. Die LCD-Panels als Teil der elektronischen Komponenten verursachen für die Wirkungskategorien Frischwasser Ökotoxizität (FETP: 28,2%) und Seewasser Ökotoxizität (METP: 25,9%) den größten Anteil am durchschnittlichen Gesamtherstellungsaufwand. Die Kunststoffe haben für die Kategorien Ozonabbau (ODP: 94,2%) und Frischwasser Eutrophierung (FEP: 32,5%) den größten Anteil am durchschnittlichen Produktionsaufwand.

Die midpoint-Indikatorenergebnisse wurden durch Aggregation zu 3 endpoint-Indikatoren zusammengefasst und sind für den Gerätetyp Epson EB93 (Abb. 13) sowie einen durchschnittlichen Videoprojektor (Abb.14) dargestellt. Durch die schadensorientierte Gewichtung gemäß ReCiPe geht vom Klimawandel das größte Gefährdungspotenzial aus für die Schutzgüter Menschliche Gesundheit und Ökosystem bzw. Biodiversität. Für den Ressourcenverbrauch hat der Verbrauch fossiler Rohstoffe den größeren Anteil als der Metallverbrauch.

29 Für die Kategorien Natürliche Landumwandlung sowie Urbane Landnutzung liegen in der GaBi-Datenbank zur Modellierung der bestückten Leiterplatten keine Daten vor (s. Anhang). Daher werden diese Indikatorenergebnisse nur dargestellt, aber nicht weiter berücksichtigt.

30 Für Abkürzungen siehe Anhang.

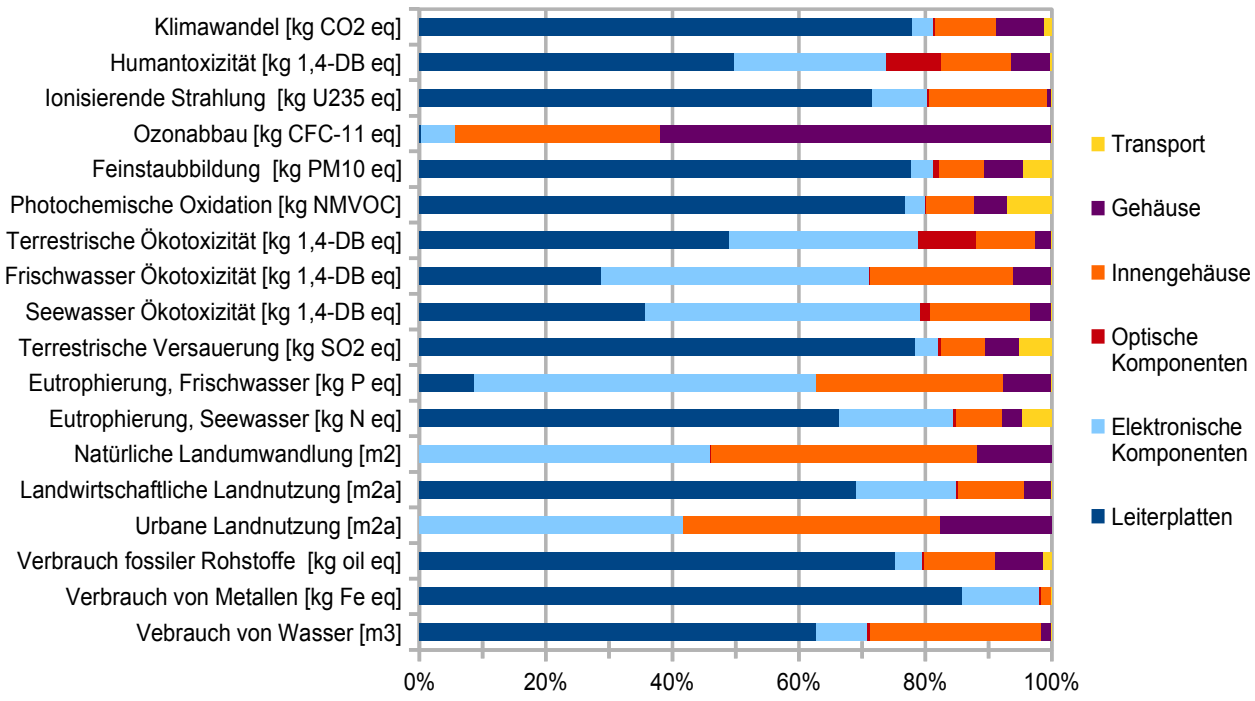

Abb. 9 - Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Hauptkomponenten des Epson EB93

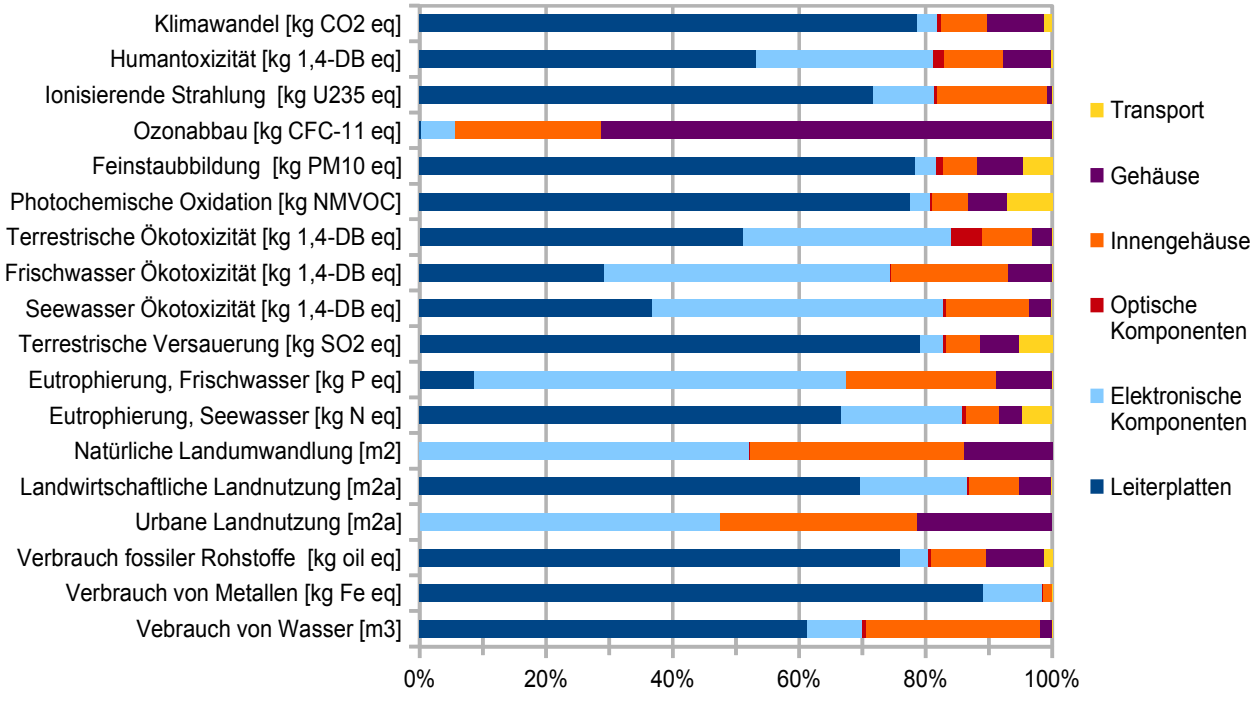

Abb. 10 - Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Hauptkomponenten eines durchschnittlichen Projektors (n=3)

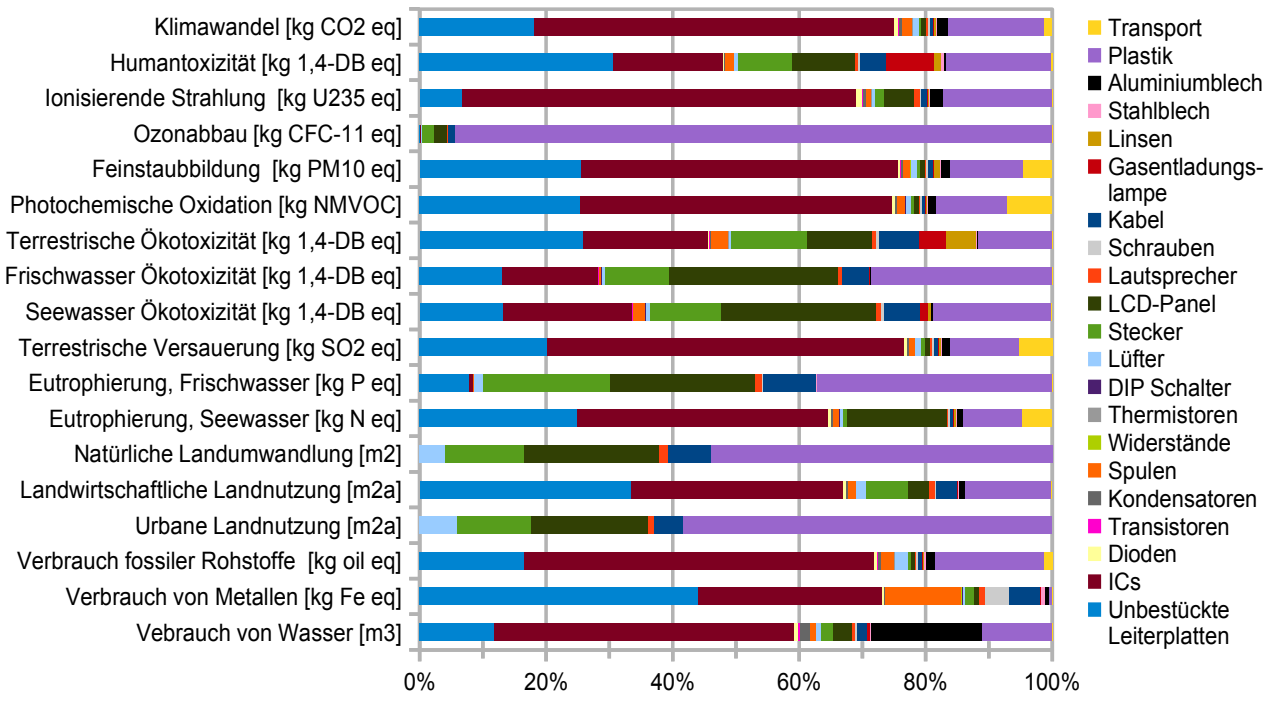

Abb. 11 - Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Subkomponenten des Epson EB93

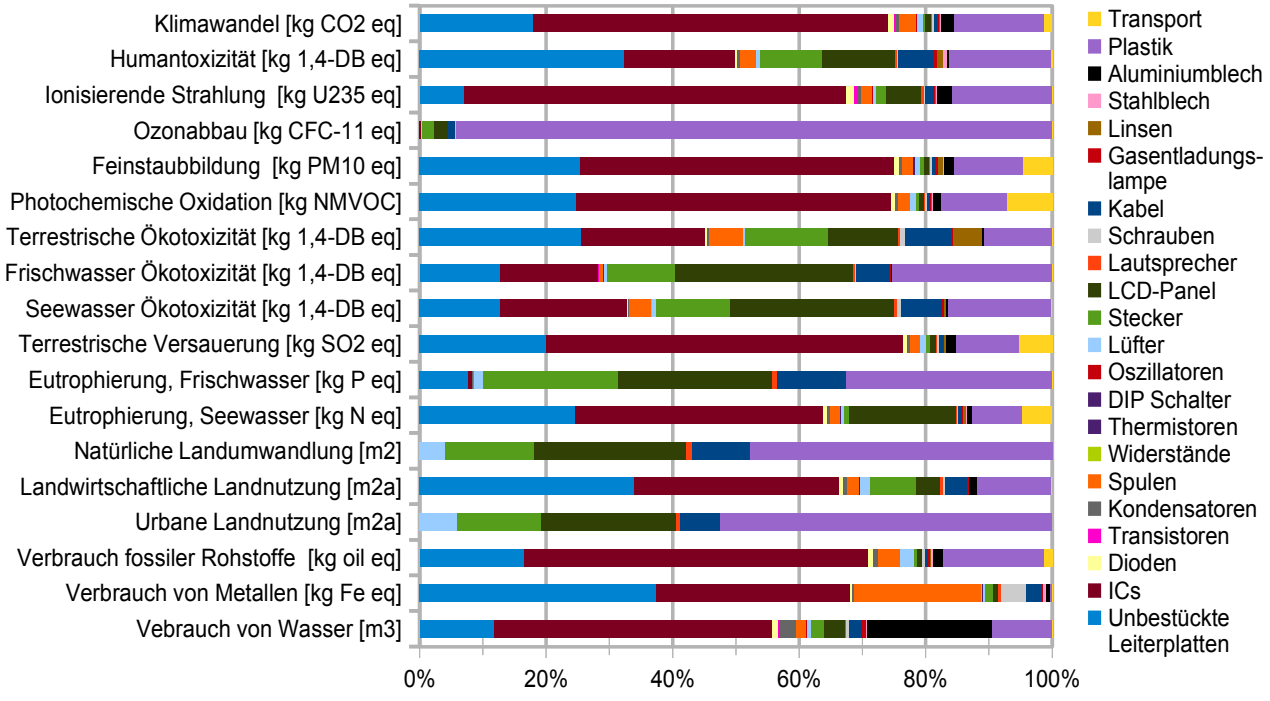

Abb. 12 - Midpoint-Umweltindikatoren für die Produktion der Subkomponenten eines durchschnittlichen Projektors (n=3)

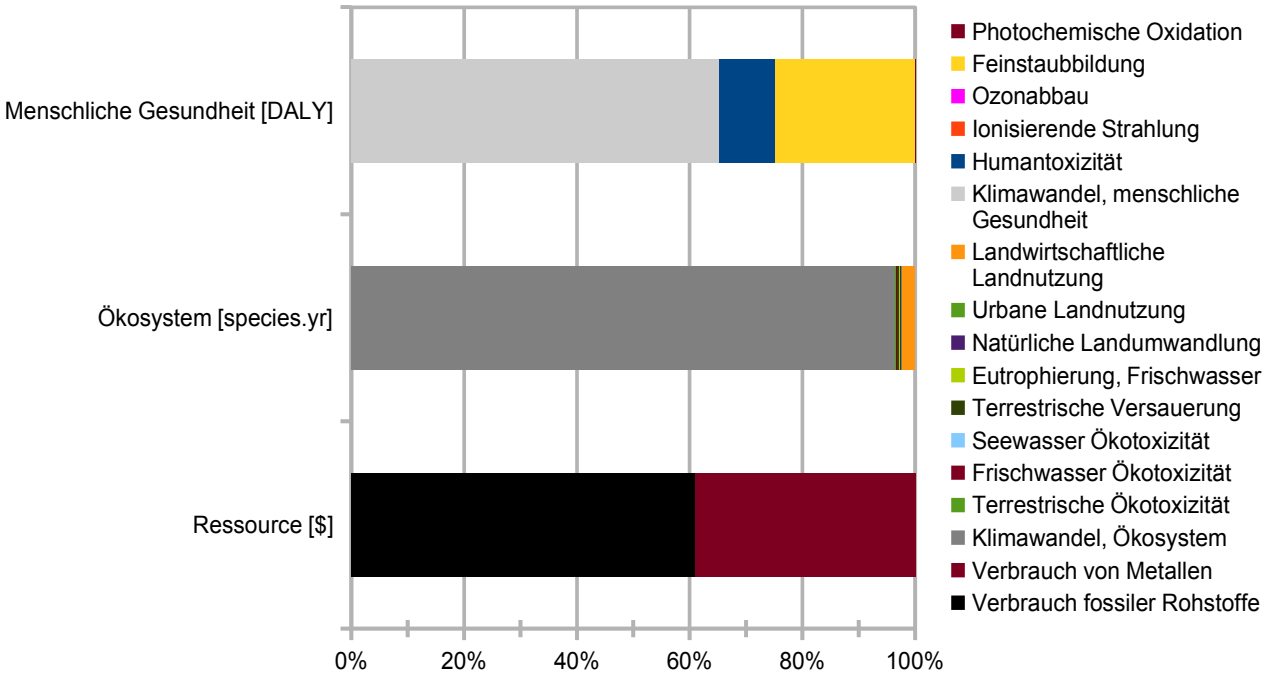

Abb. 13 - Endpoint-Umweltindikatoren[31] für die Produktion der Komponenten des Epson EB93

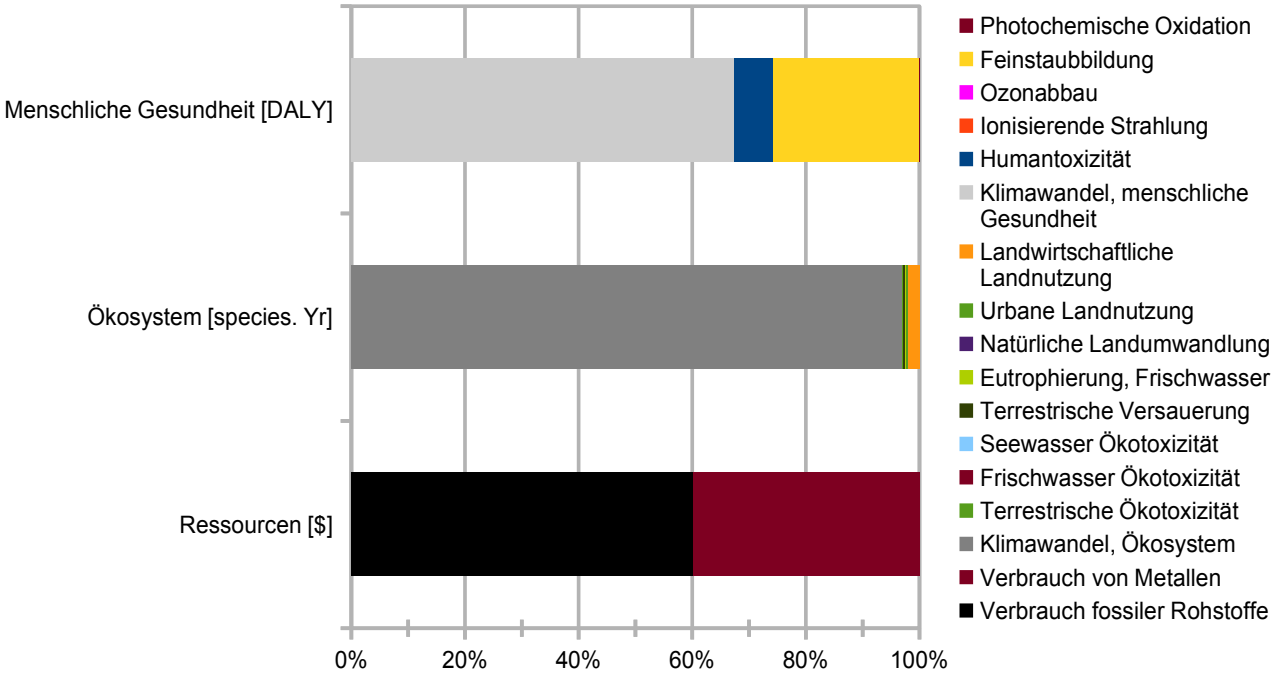

Abb. 14 - Endpoint-Umweltindikatoren[31] für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors (n=3)

31 Einheit **[DALY - disability-adjusted life years]**: in Abweichung der Lebenserwartung durch vorzeitigen Tod sowie durch Krankheit bzw. Behinderung verlorene Lebensjahre;
Einheit **[loss of species during a year]**: Verlust von Arten pro Jahr;
Einheit **[increased cost]**: erhöhte Kosten

3.2.2 Produktlebenszyklus bei Aufbereitung und Wiederverwendung

Im folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Lebenswegabschnitte eines durchschnittlichen Projektors für die berücksichtigten Umweltkategorien Klimawandel, kumulierter Energieaufwand und Metallverbrauch dargestellt. Beim Untersuchungsszenario der Aufbereitung und Wiederverwendung erfolgen Gutschriften für die vermiedene Produktion von Primärrrohstoffen bei der Reparatur eines defekten Gebrauchtgeräts sowie bei der Ersatzteilgewinnung in Höhe von 67% bzw. 20% des Produktionsaufwands.

Die Treibhausgaspotenzial eines durchschnittlichen Projektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung beträgt 452,9 kg CO_2-eq. für den gesamten Produktlebenszyklus abzüglich der Gutschriften (Abb. 15). Der größten Anteil an den GWP-Emissionen resultiert aus dem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Endgeräts bei einer Gesamtnutzungsdauer von 7 Jahren und beträgt 317,4 kg CO_2-eq. bei Erstnutzung und 126,7 kg CO_2-eq. bei Zweitnutzung. Der durchschnittliche Produktionsaufwand beträgt 80,7 kg CO_2-eq. Die Gutschriften für die Aufbereitung betragen im Durchschnitt -54,1 kg CO_2-eq. bei der Reparatur sowie -16,1 kg CO_2-eq. bei der Ersatzteilgewinnung und entsprechen einer Reduzierung der GWP-Emissionen von insgesamt 70,2 kg CO_2-eq. Hingegen fällt der Aufbereitungsaufwand von 0,3 kg CO_2-eq. bei der Reparatur bzw. -0,2 kg CO_2-eq. bei der Ersatzteilgewinnung kaum ins Gewicht am GWP-Gesamtergebnis. Da der Ersatzteilgewinnung auch die Entsorgung des Restabfalls in Höhe von 13% eines defekten Gebrauchtgeräts zugrunde liegt, ergibt sich ein negativer Betrag durch die stoffliche Verwertung von Metallen bzw. thermische Verwertung von Plastik. Die endgültige Entsorgung von einem Gebrauchtgerät nach der 2. Nutzung (stoffliche Verwertung von Plastik und thermische Verwertung von Metallen) hat mit einem durchschnittlichen Beitrag von -1,8 kg CO_2-eq. einen geringen Einfluss auf das GWP-Gesamtergebnis.

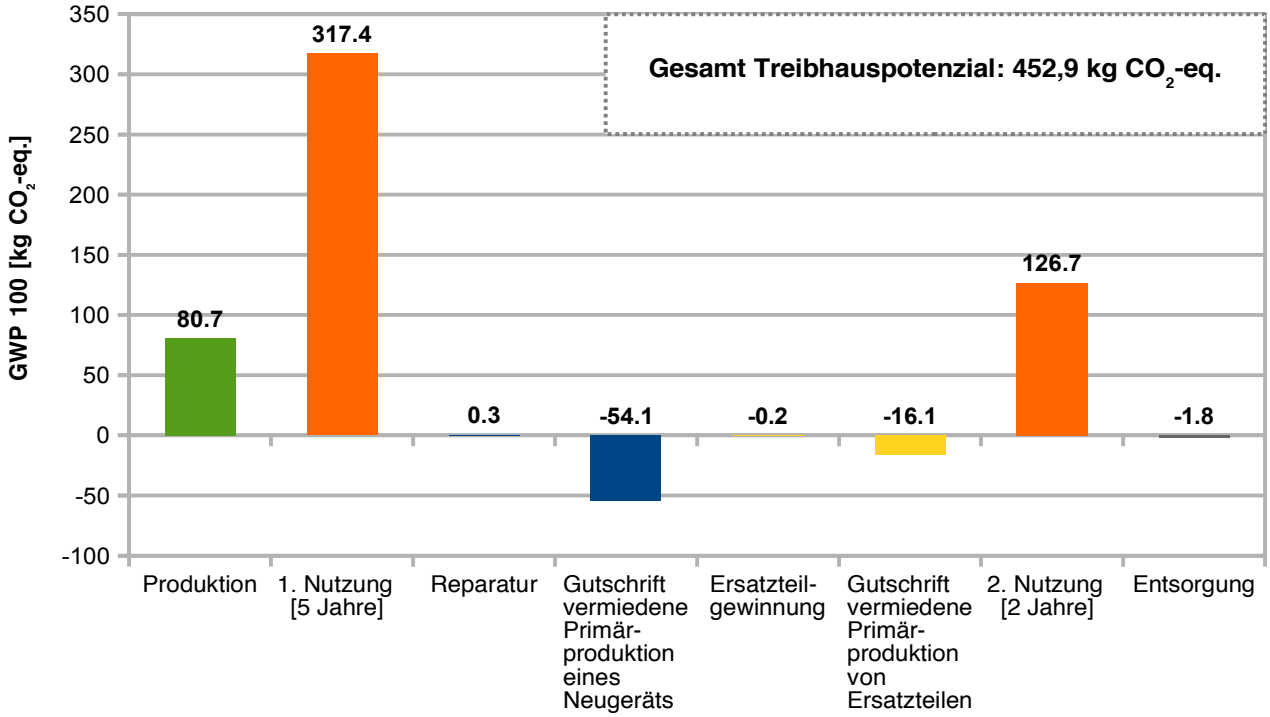

Abb. 15 - Treibhausgaspotenzial eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei Aufbereitung und Wiederverwendung

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) bzw. Primärenergieaufwand bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Projektors beträgt 10 129 MJ für den gesamten Produktlebenszyklus abzüglich der Gutschriften (Abb. 16). Den größten Anteil am Primärenergieaufwand ergibt sich aus der Nutzungsphase bei einer Gesamtnutzungsdauer von 7 Jahren mit 7156 MJ bei Erstnutzung und 2858 MJ bei Zweitnutzung. Der durchschnittliche Produktionsaufwand beträgt 1214 MJ. Die Gutschriften für die Aufbereitung betragen im Durchschnitt -813 MJ bei der Reparatur sowie -243 MJ bei der Ersatzteilgewinnung und entsprechen einer Reduzierung des Primärenergieaufwands von insgesamt 1056 MJ. Der Aufbereitungsaufwand von 5 MJ bei der Reparatur bzw. -3 MJ bei der Ersatzteilgewinnung haben einen geringen Einfluss in Bezug auf den Gesamtprimärenergieaufwand. Die endgültige Entsorgung von einem Gebrauchtgerät nach der 2. Nutzung entspricht einer stofflichen Verwertung von Plastik bzw. thermischen Verwertung von Metallen und hat einen durchschnittlichen Betrag von -45 MJ.

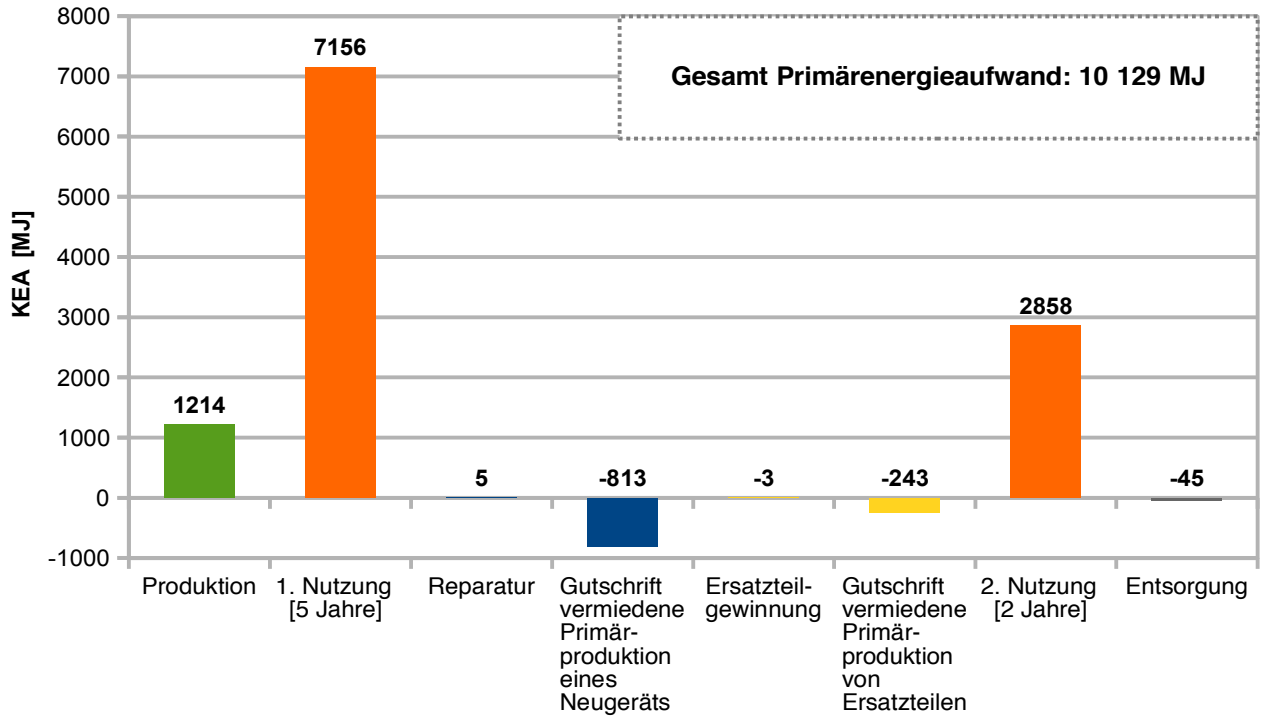

Abb. 16 - Primärenergieaufwand eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei Aufbereitung und Wiederverwendung

Das Metallverbrauchspotenzial (Mineral Depletion Potential) bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Projektors beträgt 5,6 kg Fe-eq. für den gesamten Produktlebenszyklus abzüglich der Gutschriften (Abb. 17). Nichtsdestotrotz fällt bei der Produktion der größte Anteil in Höhe von 35,4 kg Fe-eq. am MDP-Gesamtergebnis an[32]. Der Metallverbrauch bei der Nutzungsphase mit 1,4 kg Fe-eq. bei Erstnutzung und 0,6 kg Fe-eq. bei Zweitnutzung hat einen geringen Anteil in Bezug auf das MDP-Gesamtergebnis. Die Gutschriften für die Aufbereitung betragen im Durchschnitt -23,7 kg Fe-eq. bei der Reparatur sowie -7,1 kg Fe-eq. bei der Ersatzteilgewinnung.

32 Dieser vergleichsweise hohe Wert für die Herstellung der notwendigen Metalle eines Projektors ergibt sich aus der ökonomischen Allokation der Metalle im Hintergrundsystem mit unterschiedlichen Marktpreisen für die Extraktion der Minerale (Goedkoop et al., 2013; S. 109 ff.).

Da der Metallverbrauch bei der Nutzungsphase von geringer Bedeutung ist und die Gutschriften in Abhängigkeit vom Produktionsaufwand erteilt werden, ergibt sich ein verhältnismäßig geringes MDP-Gesamtergebnis.

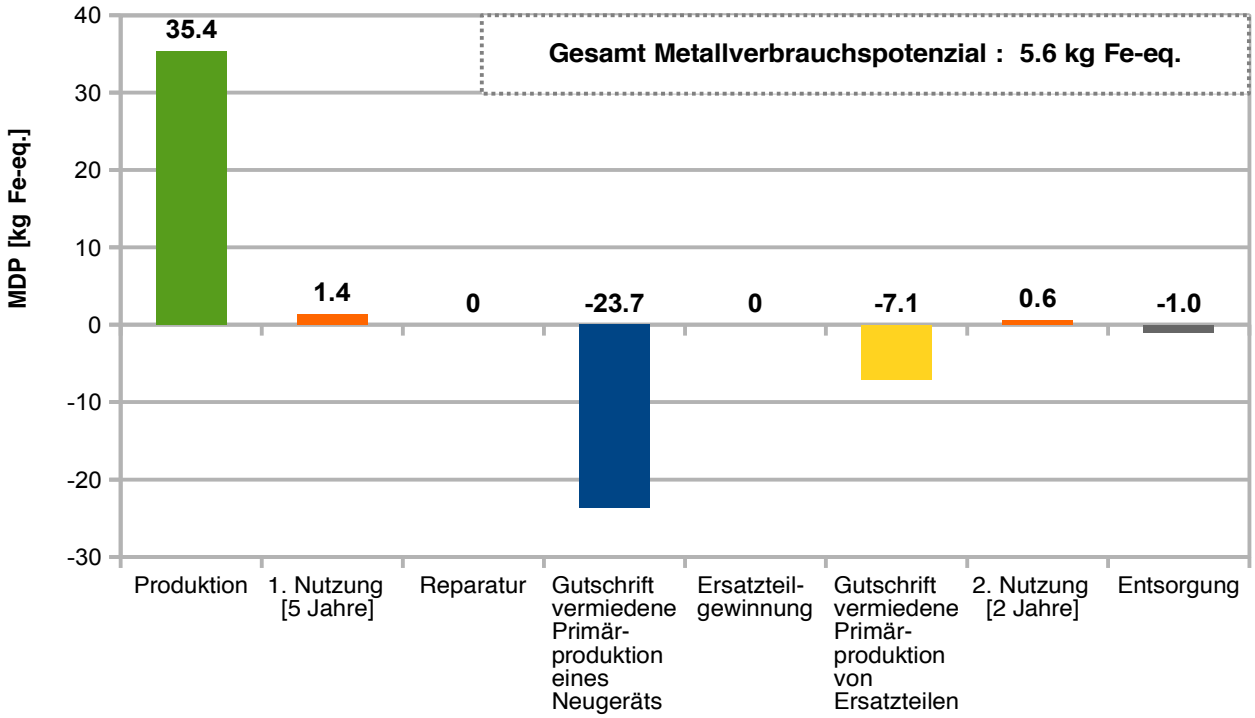

Abb. 17 - Metallverbrauchspotenzial eines durchschnittlichen Projektors über den Lebensweg bei Aufbereitung und Wiederverwendung

3.2.3 Vergleich von Gebrauchtgerät und Neugerät

Im folgenden werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung eines gebrauchten Projektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts dargestellt für die Umweltindikatoren Treibhausgaspotenzial, Primärenergieaufwand und Metallverbrauchspotenzial. Bei der Wiederverwendung bzw. Nutzung mit einer Nutzungsdauer von 2 Jahren wurden die Umweltwirkungen der untersuchten Gebrauchtgeräte mit einer durchschnittlichen Energieeffizienz von 0,111 W/lm im Vergleich zu einem 5% bzw. 10% energieeffizienteren Neugerät (0,105 bzw. 0,100 W/lm) ermittelt.

Das GWP-Potenzial bei der Produktion eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts abzüglich der Gutschriften für die Reparatur und Ersatzteilgewinnung beträgt 10,5 kg CO_2-eq.(Abb. 18)[33]. Durch den Aufbereitungsaufwand fallen bei der Reparatur und Ersatzteilgewinnung 0,1 kg CO_2-eq. an. Die Entsorgung beträgt -1,8 kg CO_2-eq. Bei der Nutzung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts fallen weitere 126,7 kg CO_2-eq. an. Daraus ergibt sich ein GWP-Potenzial von insgesamt 135,5kg CO_2-eq. bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines bereits produzierten Gebrauchtgeräts.

Das GWP-Potenzial bei der Produktion eines Neugeräts beträgt für beide Varianten 80,7 kg CO_2-eq. Da die Unterschiede zwischen den Produktionsprozessen bei unterschiedlichen Produktgenerationen kleiner sind als die Datenunsicherheiten, wurde eine Produktivitätssteigerung für die

33 Siehe Abschnitt 3.2.2

Neugeräte im Vergleich zum Gebrauchtgerät nicht berücksichtigt[34]. In der Nutzungsphase ergibt sich mit 114,6 kg CO_2-eq. bei einem 5% energieeffizienteren Neugerät bzw. 109,2 kg CO_2-eq. bei einem10% energieeffizienteren Neugerät ein leichtes GWP- Einsparungspotenzial von 12,1 kg CO_2-eq. bzw. 17,5 kg CO_2-eq. im Vergleich zur Nutzung eines energieintensiveren Gebrauchtgerät. Nichtsdestotrotz betragen die GWP-Potenziale insgesamt 193,5 kg CO_2-eq. bzw. 188,1 kg CO_2-eq. für die Produktion und Nutzung der Neugeräte und fallen im Verhältnis höher aus als die potenziellen Treibhausbelastungen des Gebrauchtgerätes. Damit ergibt sich bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts ein GWP-Entlastungspotenzial von 58,0 g CO_2-eq. bzw. 52,6 kg CO_2-eq im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts mit einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10%. Das GWP- Einsparpotenzial entspricht einer Autofahrt von ca. 360 km bzw. 330 km mit einem Kleinwagen bei einem Verbrauch von 7 l / km (ohne die Herstellung)[35].

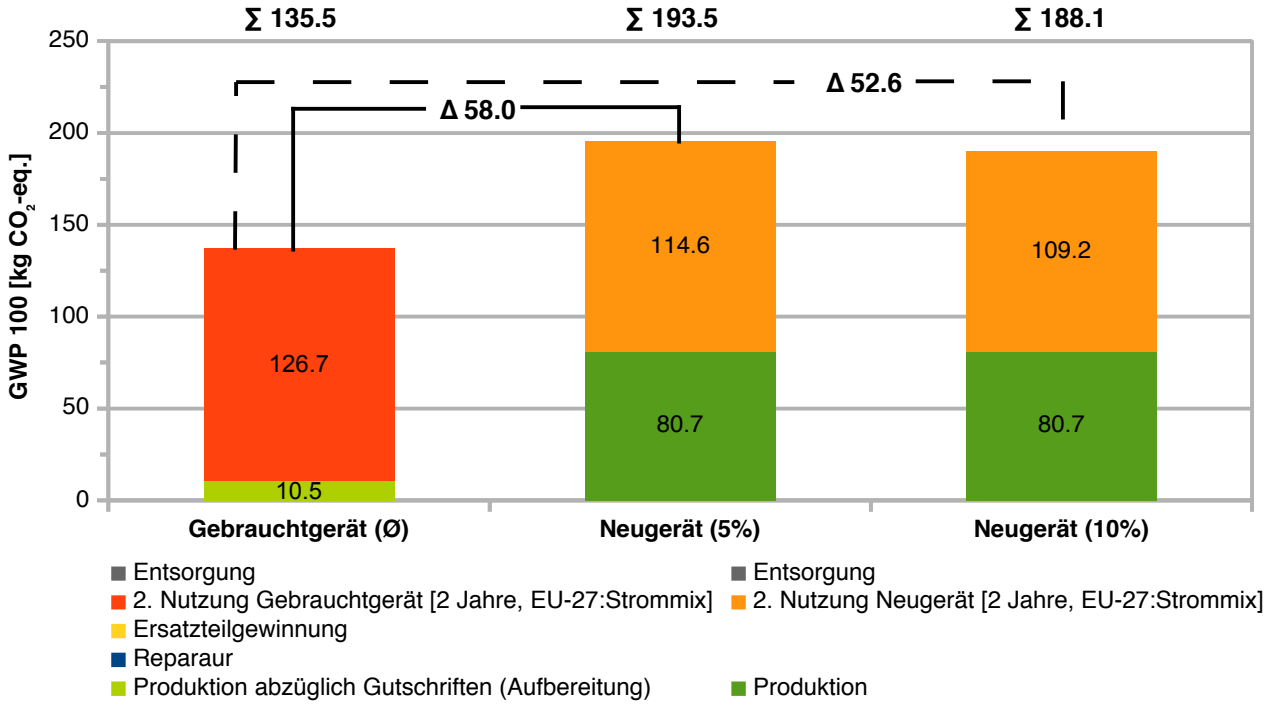

Abb. 18 - GWP-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts (Ø) im Vergleich zum Neugerät mit 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung. Die Treibhauspotenziale sind innerhalb des Balkens für Produktion und Nutzung, oberhalb des Diagramms für den Gesamtlebenszyklus (∑) sowie für den Gesamtlebenszyklus des Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät (∆) dargestellt.

Der Primärenergieaufwand bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts beträgt abzüglich der Gutschriften für die Reparatur, Ersatzteilgewinnung sowie Entsorgung insgesamt 2973 MJ (Abb. 19)[36]. Für die Neugeräte beträgt der Primäraufwand der Produktion und Nutzung insgesamt 3754 bzw. 3632 MJ. Damit ergibt sich bei Aufbereitung und

34 Siehe Abschnitt 2.4.1

35 http://wwf.klimaktiv-co2-rechner.de/de_DE/popup/ [Zugriff 27.05.2015]

36 Siehe Abschnitt 3.2.2

Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts für den Primäraufwand ein Entlastungspotenzial von 781 MJ bzw. 659 MJ im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts mit einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10%.

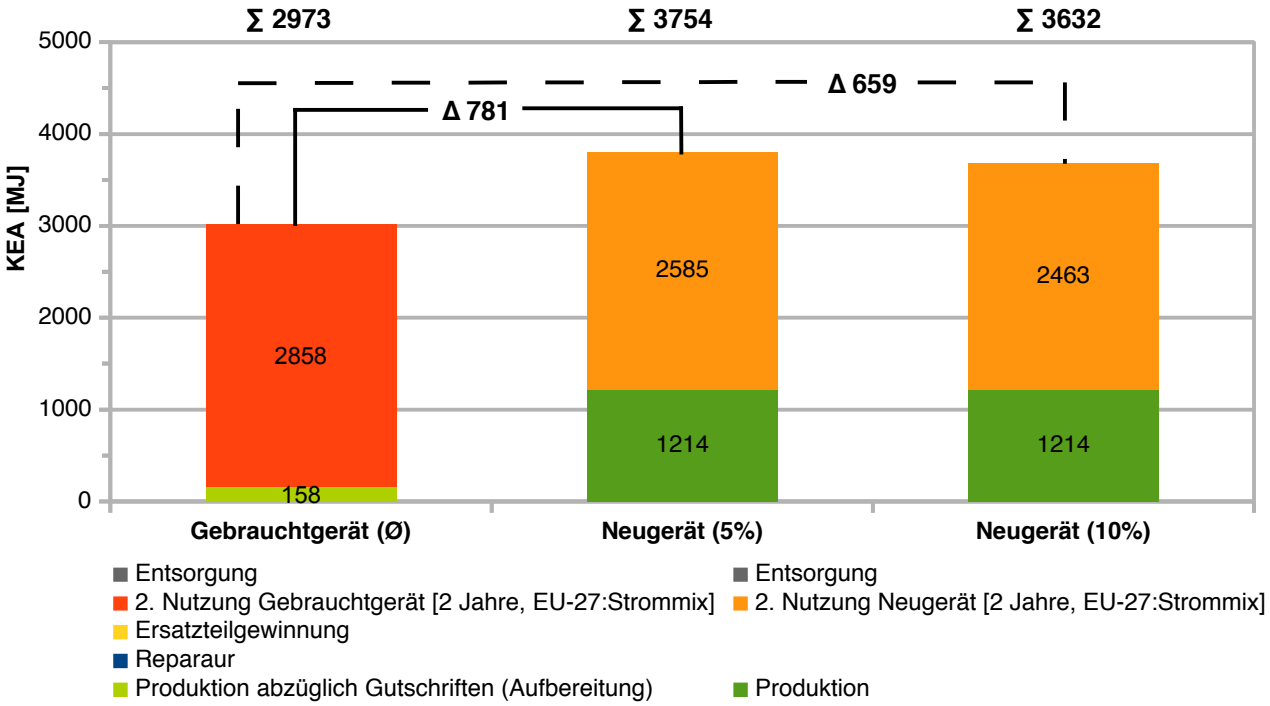

Abb. 19 - KEA-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät mit 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung. Der Primärenergieaufwand ist innerhalb des Balkens für die Produktion und Nutzung, oberhalb des Diagramms für den Gesamtlebenszyklus (∑) sowie für den Gesamtlebenszyklus des Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät (∆) dargestellt.

Der Metallverbrauch bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts beträgt abzüglich der Gutschriften für die Reparatur, Ersatzteilgewinnung sowie Entsorgung insgesamt 4,2 kg Fe-eq. (Abb. 20)[37]. Hingegen beträgt der Metallverbrauch bei Produktion und Nutzung der Neugeräte für beide Varianten insgesamt 34,9 kg Fe-eq. Da die Energieeffizienz der Neugeräte in der Nutzungsphase für den Metallverbrauch unwesentlich ist, ergibt sich bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts ein MDP-Entlastungspotenzial von 30,7 kg Fe-eq. im Vergleich zur Produktion und Nutzung beider Neugeräte.

37 Siehe Abschnitt 3.2.2

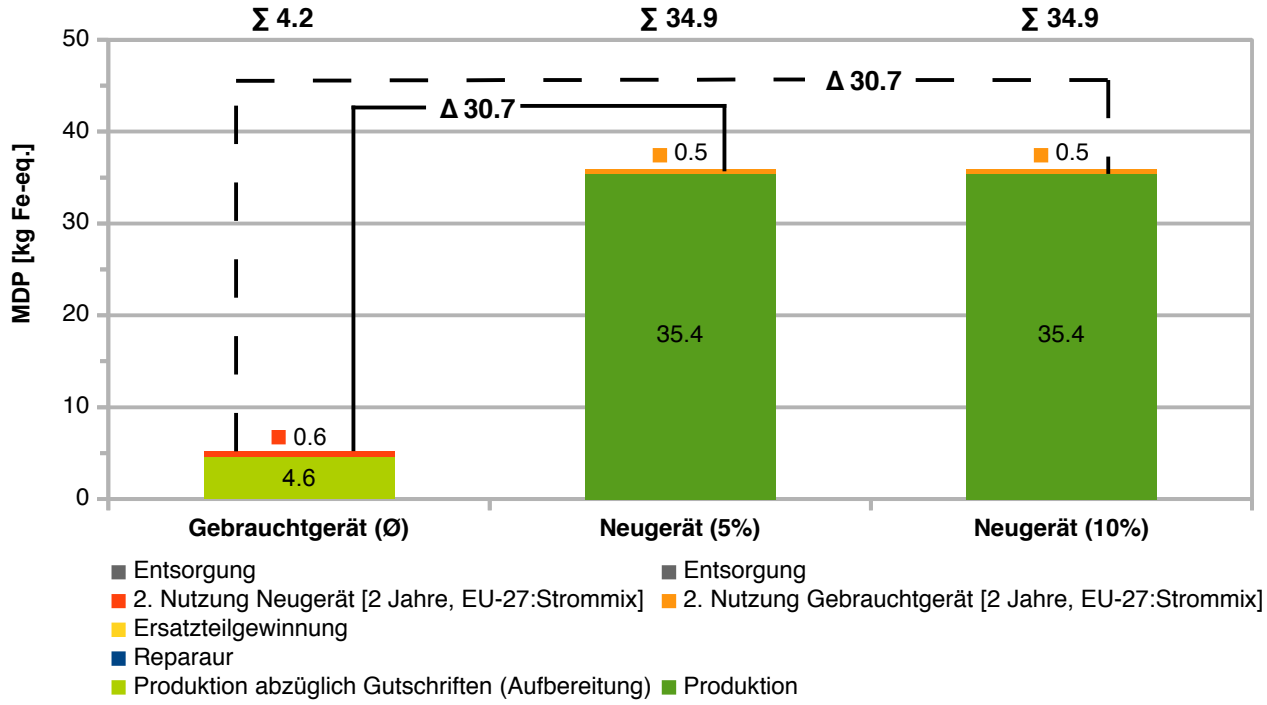

Abb. 20 - MDP-Entlastungspotenziale eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät bei 5% bzw. 10% Energieeffizienzsteigerung. Die Metallverbrauchspotenziale innerhalb des Balkens für die Produktion und Nutzung, oberhalb des Diagramms für den Gesamtlebenszyklus (∑) sowie für den Gesamtlebenszyklus des Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät (Δ) dargestellt.

3.3 Berechnung der Amortisationszeit

Die Berechnung der Amortisationszeit wurde für die GWP-Emissionen durchgeführt. Unter der Annahme einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10% bei gleicher Helligkeit ergibt sich ein Einsparpotenzial von 6,0 bzw. 8,7 CO_2-eq. pro Jahr in der Nutzungsphase im Vergleich zum Gebrauchtgerät (Tab. 6). Die Amortisationszeit der Herstellungsemissionen eines Neugeräts beträgt in Abhängigkeit von der Energieeffizienzsteigerung etwa 14 Jahre, wenn der neue Projektor in der Nutzung 5% energieeffizienter ist bzw. ca. 10 Jahre, sofern die Nutzung des Neugeräts 10% energieeffizienter im Vergleich zum Gebrauchtgerät ist. **Nach 10 bzw. 14 Jahren Nutzung amortisiert sich der Treibhausaufwand bei der Herstellung eines 10% bzw. 5% energieeffizienteren Neugeräts.**

Tab. 6 - Amortisationszeit der Herstellungsemissionen eines durchschnittlichen Projektors bei Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase

Amortisationszeit (Strommix, EU-27)	**Gebrauchtgerät (Ø)**	**Neugerät (5 %)**	**Neugerät (10%)**
GWP Produktion [kg CO_2-eq.]	80,7	80,7	80,7
GWP Nutzung pro Jahr [kg CO_2-eq.]	63,3	57,3	54,6
GWP Einsparpotenzial pro Jahr [kg CO_2-eq.]	-	6,0	8,7
Amortisationszeit der Herstellungsemissionen [Jahre]	-	13,5	9,3

4 Diskussion

4.1 Auswertung

4.1.1 Beitrag der Komponenten am Gesamtherstellungsaufwand

Für die vorliegende Analyse der Materialzusammensetzung eines durchschnittlichen Projektors wurden alle für die Produktgruppe wesentlichen Bestandteile erfasst[38]. Alle gemäß der Primärdaten enthaltenen Stoffströme wurden mit Einschränkung der definierten Abschneidekriterien berücksichtigt. Die skalierte Modellierung der bestückten Leiterplatten einschließlich der elektronischen Baugruppenelemente schöpft die mögliche Detailtiefe der Electronics Database Extension der GaBi-Datenbank voll aus. Mit den zugrundeliegenden Primärdaten aus drei für den Schul- und Officebereich typischen Projektoren wurde eine solide Datengrundlage geschaffen für einen durchschnittlichen Videoprojektor, welcher in Bezug auf seine Materialzusammensetzung und technischen Kenndaten für einen Großteil des europäischen Handelsvolumens repräsentativ ist (vgl. AEA, 2010).

Die Analyse der Hauptkomponenten eines durchschnittlichen Projektors hat gezeigt, dass die elektronischen Komponenten inklusive der bestückten Leiterplatten den größten Anteil am Gesamtherstellungsaufwand in Höhe von 81,8 % für den Klimawandel und 98,4 % für den Metallverbrauch haben. Bei der Analyse der Subkomponenten eines durchschnittlichen Projektors wurden als signifikante Parameter des Gesamtproduktionsaufwands die Integrierten Schaltungen mit einem Anteil von 56,2% für den Klimawandel sowie die unbestückten Leiterplatten mit einem Anteil von 37,4 % für den Metallverbrauch identifiziert.

4.1.2 Beitrag der Lebenszyklusphasen am Gesamtlebenszyklus

Die Verteilung der Treibhausgasemissionen auf die untersuchten Lebenswegabschnitte hat gezeigt, dass die Nutzungsphasen mit einer Gesamtnutzungsdauer von 7 Jahren den größten Beitrag in Höhe von 314,7 kg CO_2-eq. bei Erstnutzung und 126,7 kg CO_2-eq. bei Zweitnutzung am GWP-Gesamtergebnis (452,9 kg CO_2-eq. abzüglich der Gutschriften) eines durchschnittlichen Projektors bei Aufbereitung und Wiederverwendung haben, gefolgt von der Produktionsphase mit 80,7 kg CO_2-eq. Für den Primärenergieaufwand stellt die Nutzungsphase in Höhe von 7156 MJ bei Erstnutzung und 2858 MJ bei Zweitnutzung ebenso den größten Anteil am KEA-Gesamtergebnis (10 129 MJ abzüglich der Gutschriften) dar, während der Herstellungsaufwand 1214 MJ beträgt. Beim Metallverbrauch hingegen hat die Produktionsphase mit 35,4 kg Fe-eq. den größten Anteil, während die Gesamtnutzungsphase mit 2,0 kg Fe-eq. einen unwesentlichen Beitrag am MDP-Gesamtergebnis (5,6 kg Fe-eq, abzüglich der Gutschriften) hat.

Die vorliegenden Ergebnisse stimmen mit der EuP-Studie (AEA, 2010) sowie der Umweltdeklaration des Epson EH-DM30 (JEMAI, 2010) in Bezug auf die vergleichsweise höheren GWP-Emissionen bzw. den Primäraufwand bei der Nutzungsphase gegenüber dem Produktionsaufwand

38 Vgl. hierzu auch: Product Category Rules (PCR) for preparing an Environmental Product Declaration (EPD) for Digital Projector (PCR 2011: 1.0). http://pcr-library.edf.org.tw/data/taiwan/EDF201103_EPD-PCR_Electronic_Projector.pdf [Zugriff 27.07.2015]

überein[39]. Der aus drei Projektoren ermittelte Produktionsaufwand eines durchschnittlichen Videoprojektors in Höhe von 79,7 kg CO_2-eq. (abzüglich des Transports) fällt jedoch höher aus als die berechneten Herstellungsemissionen eines typischen LCD-Projektors in der EuP-Studie mit 27 kg CO_2-eq. sowie des Epson EH-DM30 mit 46,2 kg CO_2-eq. Möglicherweise sind die vergleichsweise geringen Herstellungsemissionen auf methodische Vorgehensweisen (Systemgrenzen, Abschneidekriterien, insbesondere bei den Subkomponenten wie z.B. Integrierte Schaltungen), verwendete Datenbanken sowie Bilanzierungsmethoden zurückzuführen. Im Falle des Epson EH DM30 reduziert sich die Klimaamortisationszeit von ca. 10 auf 8 Jahre bzw. von etwa 10 auf 6 Jahre im Vergleich zum 5% bzw. 10% energieeffizienteren Neugerät. Damit stellt die Zweitnutzung sogar mit den vergleichsweise geringeren Produktionsemissionen immer noch die umweltfreundlichere Alternative dar als die einmalige Nutzung mit anschließendem Austausch für ein energieeffizienteres Nachfolgemodell.

4.1.3 Vergleich von Gebrauchtgerät und Neugerät

Für die vergleichende Bilanzierung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts gegenüber einem Neugeräts, wurden zunächst die technischen Kennwerte vergleichbarer und zum Zeitpunkt der Studie aktuell auf dem Markt erhältlicher Nachfolgermodelle untersucht. Bei dieser Auswertung stellte sich jedoch heraus, dass die Neugeräte in Bezug auf den produktionsrelevanten Materialverbrauch sowie den nutzungsrelevanten Energiebedarf tatsächlich weder leichter noch energieeffizienter im Vergleich zu den untersuchten Gebrauchtgeräten sind (s. Tab. im Anhang)[40]. Die für die vergleichende Bilanzierung verwendete Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10% der Neugeräte (0,105 W/lm bzw. 0,100 W/lm) erscheint vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Technik daher hinreichend zweckmäßig.

Die vergleichende Bilanzierung hat gezeigt, dass sich bei Aufbereitung und Wiederverwendung eines durchschnittlichen Gebrauchtgeräts ein GWP-Entlastungspotenzial von 58,0 g CO_2-eq. ergibt im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts mit einer Energieeffizienzsteigerung von 5%. Bei einer Energieeffizienzsteigerung des Neugeräts von 10% beträgt das GWP-Entlastungspotenzial von 52,6 kg CO_2-eq. Für den Primäraufwand ergibt sich ein Entlastungspotenzial von 781 MJ bzw. 659 MJ im Vergleich zur Produktion und Nutzung eines Neugeräts mit einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10%. Da für den Metallverbrauch die Energieeffizienz der Nutzungsphase unbedeutend ist, beträgt das MDP-Entlastungspotenzial 30,7 kg Fe-eq. im Vergleich zur Produktion und Nutzung beider Neugeräte. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der Produktionsaufwand eines durchschnittlichen Projektors so hoch sind, dass die professionelle Aufarbeitung und Wiederverwendung eines Gebrauchtgeräts aus Umweltschutzgründen nicht nur sinnvoll ist, sondern auch ein größeres Entlastungspotenzial als ein energieeffizientes Neugerät aufweisen. Die Studie kommt damit zu einem ähnlichen Ergebnis im Vergleich zur Aufbereitung anderer IKT-Produktgruppen (Notebooks, Desktop PC und TFT-Monitor): die herstellungsbedingten Umweltbelastungen eines energieeffizienteren Neugeräts sind höher als die durch eine verlängerte Nutzung ausgehende Belastung eines verbrauchsintensiven Altgeräts (vgl. Scheumann & Becker, 2013).

---

39 Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Vergleichbarkeit durch zugrundeliegenden Annahmen wie Nutzungsmuster, Stromverbrauch, etc. (vgl. Andrea & Andersen, 2010).

40 Die durchschnittliche Leistungsaufnahme der Neugeräte in Höhe von 0,110 W/lm ist im Vergleich zum durchschnittlichen Energiebedarf der Gebrauchtgeräte von 0,111 W/lm bei gleicher Helligkeit (2400 lm) mit einer Differenz von 0,001 W/lm unwesentlich geringer.

4.1.4 Amortisationszeit

Mit der Berechnung der Amortisationszeit wurde untersucht, wann die Treibhausgasemissionen bei der Produktion durch die Steigerung der Energieeffizienz bei der Nutzung kompensiert werden. Die Amortisationszeit der GWP-Herstellungsemissionen beträgt etwa 14 Jahre, wenn der neue Projektor in der Nutzung 5% energieeffizienter ist bzw. ca. 10 Jahre bei einem 10% energieeffizienteren Neugerät. D.h. die mit der Herstellung verursachten Treibhausgasemissionen eines Neugeräts werden nach etwa 14 Jahren Gesamtnutzungsdauer bei einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. ca. 10 Jahren Gesamtnutzungsdauer bei einer Energieeffizienzsteigerung von 10% kompensiert. Bei einer angenommenen Erstnutzungsdauer von 5 Jahren des Gebrauchtgeräts lohnt eine Wiederverwendung des verbrauchsintensiveren Gebrauchtgeräts mit einer Zweitnutzungsdauer von bis zu 9 Jahren bzw. 5 Jahren im Vergleich zum Ersatz durch ein Neugerät mit einer Energieeffizienzsteigerung von 5% bzw. 10%. Da der GWP-Aufwand durch die Produktion eines Neugeräts deutlich höher ist als das GWP-Einsparpotenzial des Neugeräts durch eine Energieeffizienzsteigerung bei der Nutzung im Vergleich zum Gebrauchtgerät, ist die Lebensdauerverlängerung eines verbrauchsintensiveren Gebrauchsgeräts innerhalb der Amortisationszeit mit geringeren Umweltbelastungen verbunden als der Ersatz durch ein energieeffizienteres Neugerät.

Die ermittelten Amortisationszeiten für einen durchschnittlichen Projektor sind geringer im Vergleich zu Notebooks und durch den vergleichsweise niedrigeren Produktionsaufwand plausibel (vgl. Prakash, 2012; Scheumann & Becker, 2013).

4.2 Sensitivitätsanalyse

Der Stromverbrauch in der Nutzungsphase eines energieverbrauchenden Produkts ist für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen bzw. den Primärenergieaufwand eine wesentliche Eingangsgröße. Daher wird in der folgenden Sensitivitätsanalyse der Einfluss einer veränderten Annahme über den Stromverbrauch im Vergleich zur Basisanalyse untersucht und die Größe der veränderten Parameter in Bezug auf das Gesamtergebnis überprüft (Tab. 7). Der Vergleich des Stromverbrauchs zwischen Basis- und Sensitivitätsanalyse erfolgt für die GWP-Emissionen in der Nutzungsphase bei gleicher Nutzungsdauer.

Tab. 7 - Datensätze zur Modellierung der Nutzungsphase in der Basis- und Sensitivitätsanalyse

	Datensatz	**Zeitbezug**	**Ortsbezug**	**Quelle**
Basisanalyse	Strommix, 1-60 kV[41]	2011	Europa (EU-27)	GaBi 6.0 (2014)[42]
Sensitivitätsanalyse	Strom aus Windkraft, 1-60 kV	2011	Europa (EU-27)	GaBi 6.0 (2014)[43]
	Strommix, 1-60 kV	2011	Deutschland (DE)	GaBi 6.0 (2014)[44]

41 Da der Datensatz des Stroms aus Windkraft nur in der Mittelspannung vorlag, wurde aus Konsistenzgründen die Nutzungsphase bei Mittelspannung quantifiziert.

42 http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/0a1b40db-5645-4db8-a887-eb09300b7b74.xml [Zugriff 27.07.2015]

43 http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/fe1c3d03-072b-4da7-8fff-3505f9b01efc.xml [Zugriff 27.07.2015]

44 http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/a1388758-0402-40c4-976b6a805c8e46e0.xml [Zugriff 27.07.2015]

In der Sensitivitätsanalyse wird der ergebnisrelevante Einfluss für die folgenden Fälle ermittelt:

- Anpassung des Energieträgers (Strommix vs. Strom aus Windkraft)
- Anpassung des Bezugsraums (Europa vs. Deutschland)

4.2.1 Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase

Im Basis-Szenario wurde der Stromverbrauch bei der Nutzung mit einem konventionellen Strommix, d.h. überwiegend fossilen Energieträgern, modelliert. Dieser entspricht dem Stand der europäischen Energieversorgung im Jahr 2011. Für die Sensitivitätsanalyse wurde ein Stromverbrauch aus Windkraft bei gleicher Energiebedarfsmenge angenommen und damit einem Szenario einer ausschließlich auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Stromversorgung in Europa im Jahr 2050 entspricht (EC, 2011). Die Tabelle 8 zeigt die absoluten und prozentualen Abweichungen der GWP-Emissionen in der Sensitivitätsanalyse im Vergleich zum Basis-Szenario. Bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzung ergibt sich eine prozentuale Abweichung von -98,1 % der GWP-Emissionen im Vergleich zum Basis-Szenario.

Tab. 8 - Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario

Energieträger	**GWP-Emissionsfaktor [kg CO_2-eq./kWh]**	**GWP-Wert Gebrauchsgerät (Ø) [kg CO_2-eq.]**		**GWP-Wert Neugerät (5%) [kg CO_2-eq.]**	**GWP-Wert Neugerät (10%) [kg CO_2-eq.]**
		1. Nutzung [5 Jahre]	**2. Nutzung [2 Jahre]**	**2. Nutzung [2 Jahre]**	**2. Nutzung [2 Jahre]**
Basisanalyse Strommix (EU-27)	0,452	316,7[45]	126,7	114,6	109,2
Sensitivitätsanalyse Strom aus Windkraft (EU-27)	0,008	5,89	2,36	2,13	2,03
Prozentuale Abweichung von der Basisanalyse	-98,2 %	-98,1 %	-98,1 %	-98,1 %	-98,1 %

Die veränderte Annahme über den Energieträger resultiert beim Vergleich von Gebraucht- und Neugerät (5%) in einer Zunahme des GWP-Entlastungspotenzials des Gebrauchtgeräts um 16,9 % im Vergleich zum Basis-Szenario (Tab. 9 und Abb. 21). Gegenüber dem Neugerät (10%) führt die Sensitivitätsanalyse zu einer Erhöhung des GWP-Entlastungspotenzials des Gebrauchtgeräts um 24,5 % im Vergleich zur Basisanalyse.

Tab. 9 - GWP-Entlastungspotenziale bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario

Energieträger	**GWP-Emissionsfaktor [kg CO_2-eq./kWh]**	**GWP-Entlastungspotenzial [kg CO_2-eq.]**	
		Neugerät (5%)	**Neugerät (10%)**
Basisanalyse Strommix (EU-27)	0,452	58,0	52,6
Sensitivitätsanalyse Strom aus Windkraft (EU-27)	0,008	69,8	69,7
Prozentuale Abweichung von der Basisanalyse	-98,2 %	+16,9 %	+24,5 %

45 Da hier nur der Stromverbrauch bei der 1. Nutzung betrachtet wird, weicht der GWP-Wert im Vergleich zur ermittelten 1. Nutzung inklusive Transport beim Produktlebenszyklus (Abb. 15). Siehe hierzu auch 2.4

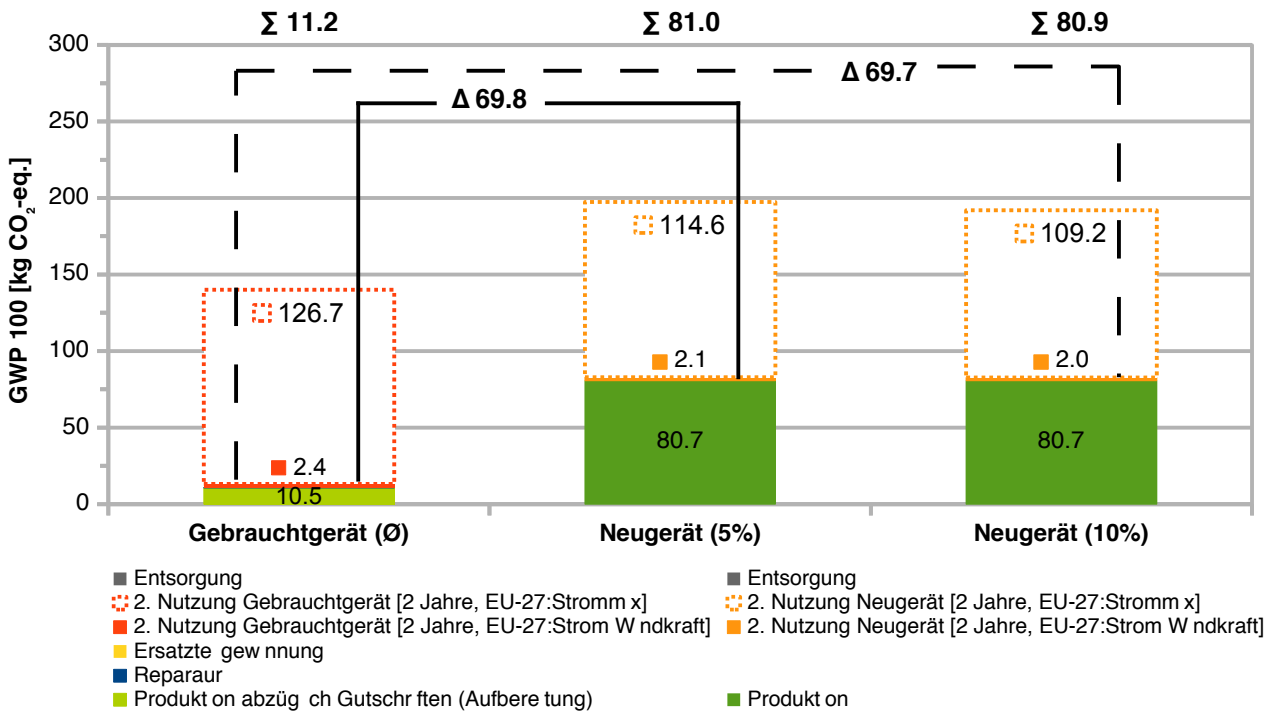

Abb. 21 - Sensitivitätsanalyse des GWP-Entlastungspotenzials bei Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase. Die Treibhauspotenziale sind innerhalb des Balkens für die Produktion und jeweils die Nutzung in der Basis- und Sensitivitätsanalyse, oberhalb des Diagramms für den Gesamtlebenszyklus (∑) sowie für den Gesamtlebenszyklus des Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät (∆) dargestellt.

4.2.2 Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase

Eine veränderte Annahme über den Bezugsraum des Stromverbrauchs in der Nutzungsphase resultiert in der Sensitivitätsanalyse mit einem deutschem Strommix in einer prozentualen Abweichung von 24,0 % der GWP-Emissionen im Vergleich zum Basis-Szenario (Tab. 10).

Tab. 10 - Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zum Basis-Szenario

Bezugsraum	**GWP-Emissionsfaktor [kg CO_2-eq./kWh]**	**GWP-Wert Gebrauchsgerät (Ø) [kg CO_2-eq.]**		**GWP-Wert Neugerät (5%) [kg CO_2-eq.]**	**GWP-Wert Neugerät (10%) [kg CO_2-eq.]**
		1. Nutzung [5 Jahre]	**2. Nutzung [2 Jahre]**	**2. Nutzung [2 Jahre]**	**2. Nutzung [2 Jahre]**
Basisanalyse Strommix (EU-27)	0,452	316,7[46]	126,7	114,6	109,2
Sensitivitätsanalyse Strommix (DE)	0,595	416,5	166,6	150,8	143,6
Prozentuale Abweichung von der Basisanalyse	+24,0 %	+24,0 %	+24,0 %	+24,0 %	+24,0 %

46 Da hier nur der Stromverbrauch bei der 1. Nutzung betrachtet wird, weicht der GWP-Wert im Vergleich zur ermittelten 1. Nutzung inklusive Transport beim Produktlebenszyklus (Abb. 15). Siehe hierzu auch 2.4

Daraus folgt für die vergleichende Bilanzierung von Gebraucht- und Neugerät eine Reduzierung des GWP-Entlastungspotenzials des Gebrauchtgeräts um -6,4 % gegenüber dem Neugerät (5%) im Vergleich zum Basis-Szenario (Tab. 11 und Abb. 22). Gegenüber dem Neugerät (10%) führt die Sensitivitätsanalyse zu einer Differenz des GWP-Entlastungspotenzials des Gebrauchtgeräts von um -10,5 % im Vergleich zur Basisanalyse.

Tab. 11 - GWP-Entlastungspotenziale bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zur Basis-Szenario

Bezugsraum	**GWP-Emissionsfaktor [kg CO_2-eq./kWh]**	**GWP-Entlastungspotenzial [kg CO_2-eq.]**	
		Neugerät (5%)	**Neugerät (10%)**
Basisanalyse Strommix (EU-27)	0,452	58,0	52,6
Sensitivitätsanalyse Strommix (DE)	0,595	54,3	47,1
Prozentuale Abweichung von der Basisanalyse	+24,0 %	-6,4 %	-10,5 %

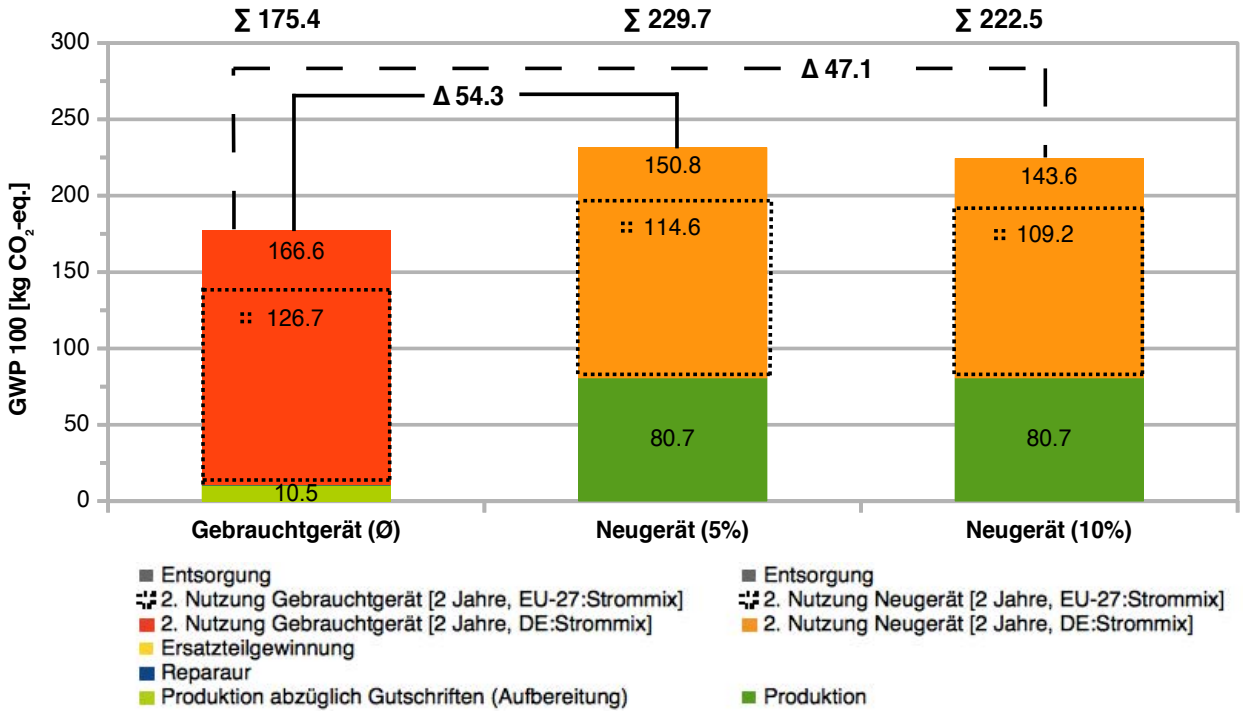

Abb. 22 - Sensitivitätsanalyse des GWP-Entlastungspotenzials bei Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase. Die Treibhauspotenziale sind innerhalb des Balkens für die Produktion und jeweils die Nutzung in der Basis- und Sensitivitätsanalyse, oberhalb des Diagramms für den Gesamtlebenszyklus (∑) sowie für den Gesamtlebenszyklus des Gebrauchtgeräts im Vergleich zum Neugerät (Δ) dargestellt.

4.2.3 Amortisationszeit bei Anpassung des Energieträgers und Bezugsraums

Die sich aus den Sensitivitätsanalysen ergebenden Abweichungen der Amortisationszeit im Vergleich zum Basis-Szenario sind in der folgenden Tabelle 12 dargestellt. Die Anpassung des Energieträgers in der Nutzungsphase führt zu einer Abnahme des Einsparpotenzials und damit zur Verlängerung der Amortisationszeit im Vergleich zum Basis-Szenario. Die Amortisationszeit der Herstellungsmissionen beträgt 807 Jahre für ein 5% energieeffizienteres Neugeräts bzw. 403,5

Jahre für ein 10% energieeffizienteres Gerät. Im Vergleich zur Basisanalyse ergibt sich eine Abweichung von 98,3 % für ein 5% energieeffizienteres Neugerät bzw. 97,7 % für ein 10% energieeffizienteres Neugerät. Die Ergebnisse zeigen, dass eine veränderte Annahme über den Energieträger einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Im Basis-Szenario wurde bereits demonstriert, dass die Wiederverwendung eines aufbereiteten Projektors höhere GWP-Entlastungspotenziale aufweist als der Ersatz durch ein energieeffizienteres Neugerät. Durch die verlängerte Amortisationszeit im Falle einer erreichten Energiewende wird deutlich, dass die Produktionsemissionen durch Energieeffizienzsteigerung in nicht realisierbaren Zeiträumen kompensiert werden können und eine verlängerte Produktlebensdauer langfristig an Bedeutung zunimmt. Da Projektoren wie die meisten elektronischen Produkte überwiegend in Asien produziert werden, ist eine fachgerechte Aufbereitung und mehrmalige Nutzung der Produkte in Europa durchaus sehr sinnvoll, um die mit dem Produkt importierten Produktionsemissionen auszugleichen.

Die Anpassung des Bezugsraums in der Nutzungsphase resultiert in einer Zunahme des Einsparpotenzials und damit zur Verkürzung der Amortisationszeit im Vergleich zur Basisanalyse. Die im Basis-Szenario für das 5% energieeffizientere Neugerät ermittelte Amortisationszeit reduziert sich von 13,5 Jahren auf 10,2 Jahre und ergibt eine prozentuale Abweichung von Basis- und Sensitivitätsanalyse in Höhe von 24,4 %. Für das 10% energieeffizientere Neugerät verkürzt sich die Amortisationszeit von 9,3 Jahren auf 7,0 Jahre mit einer prozentualen Abweichung 24,7 % im Vergleich zur Basisanalyse.

Tab. 12 - Amortisationszeit bei Anpassung des Energieträgers und Bezugsraums in der Nutzungsphase im Vergleich zur Basis-Szenario

Basisszenario Strommix (EU-27)	**Gebrauchtgerät (Ø)**	**Neugerät (5%)**	**Neugerät (10%)**
GWP Produktion [kg CO_2-eq.]	80,7	80,7	80,7
GWP Nutzung pro Jahr [kg CO_2-eq.]	63,3	57,3	54,6
GWP Einsparpotenzial pro Jahr [kg CO_2-eq.]	-	6,0	8,7
Amortisationszeit der Herstellungsemissionen [Jahre]	-	13,5	9,3
Sensitivitätsanalyse Energieträger Strom aus Windkraft (EU-27)			
GWP Nutzung pro Jahr [kg CO_2-eq.]	1,2	1,1	1,0
GWP Einsparpotenzial pro Jahr [kg CO_2-eq.]	-	0,1	0,2
Amortisationszeit der Herstellungsemissionen [Jahre]	-	807	403,5
Prozentuale Abweichung der Amortisationszeit von der Basisanalyse [%]	-	+98,3 %	+97,7 %
Sensitivitätsanalyse Bezugsraum Strommix (DE)			
GWP Nutzung pro Jahr [kg CO_2-eq.]	83,3	75,4	71,8
GWP Einsparpotenzial pro Jahr [kg CO_2-eq.]	-	7,9	11,5
Amortisationszeit der Herstellungsemissionen [Jahre]	-	10,2	7,0
Prozentuale Abweichung der Amortisationszeit von der Basisanalyse [%]	-	-24,4 %	-24,7 %

4.3 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung bestätigen, dass die Nutzungsphase eines durchschnittlichen Videoprojektors den größten Beitrag am Gesamtergebnis für den Klimawandel sowie Primärenergieaufwand verursacht. Dennoch hat die Produktionsphase eines Videoprojektors einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil am Gesamtproduktlebenszyklus, wie sich in der vergleichenden Bilanzierung gebrauchter Projektoren gegenüber energieeffizienteren Neugeräten zeigt. Die herstellungsbedingten Treibhausgasemissionen eines Neugeräts sind deutlich höher als das GWP-Einsparpotenzial durch eine Energieeffizienzsteigerung bei der Nutzung und amortisieren sich erst nach einer unrealistischen Nutzungsdauer. Weiterhin ist eine Energieeffizienzsteigerung als Argument für einen Ersatz verbrauchsintensiverer Gebrauchtgeräte bei Betrachtung der tatsächlichen Energieeffizienz neuer Projektoren nicht haltbar. Die untersuchten Gebrauchtgeräte hingegen erfüllen die in der EuP-Studie für Projektoren vorgeschlagenen Mindesteffizienz-Anforderungen[47] und liegen nur 0,001 W/lm über der Empfehlung vom Blauen Engel für umweltfreundliche Beamer[48]. Daher ist eine Verlängerung der Lebensdauer eines Gebrauchtgeräts gegenüber dem Austausch durch ein energieeffizienteres Neugerät für Projektoren in Bezug auf ihre Umweltverträglichkeit eindeutig zu empfehlen, solange der Aufbereitungsaufwand geringer ist als die Umweltauswirkungen durch die Herstellung und Entsorgung. Bei Aufbereitung gebrauchter Projektoren zur Wiederverwendung entsteht nicht nur ein Entlastungspotenzial für den Klimawandel, sondern auch für den Primärenergieaufwand sowie Metallverbrauch. Bei ca. 1500 Reparaturen defekter Altgeräte pro Jahr leistet ReBeam einen bedeutenden Beitrag zum Umweltschutz von etwa 80.000 kg CO_2-eq. eingesparter Treibhausemissionen pro Jahr. Das Unternehmen stellt damit ein erfolgreiches Beispiel dar, welches mit einer gezielten Aufbereitung und Wiedervermarktung gebrauchter Videoprojektoren die produktbezogenen Umweltauswirkungen reduziert.

Unter der Annahme, dass sich Neuerscheinungen im Materialverbrauch sowie Energiebedarf nicht wesentlich von ihren Vorgängermodellen unterscheiden und die tatsächliche Nutzungsdauer kürzer als die technische Lebensdauer ist, stellt die verlängerte Produktnutzungsdauer nicht nur für die Produktgruppe Videoprojektoren einen vielsprechenden Ansatz dar, sondern auch für Produkte der IKT und Unterhaltungselektronik. Für weitere Studien wäre es interessant zu untersuchen, wie sich im Rahmen der Integrierten Produktpolitik der EU bei einer strategischen Ausrichtung, welche sowohl den Energiebedarf in der Nutzung als auch den Ressourcenverbrauch in der Produktion und Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten adressiert, Anreize für Unternehmen schaffen lassen, die Instandhaltung, Aufbereitung und Wiederverwendung energieverbrauchsrelevanter Produkte in die gängige Praxis umzusetzen.

47 0,120 W/lm bei einer Helligkeit im Normal-Modus X = 1500 lm < X < 2500 lm (Ricardo-AEA, 2013, S.34)

48 0,110 W/lm bei einer Helligkeit im Normal-Modus X = 1750 lm < X < 2750 lm (Ökoinstitut, 2012). http://www.ecotopten.de/sites/default/files/beamer-einkaufshilfe.pdf [Zugriff 27.07.2015]

Literaturverzeichnis

AEA (2010): **Building on the Eco-design Directive, EuP Group Analysis (I) - ENTR Lot 3 Sound and Imaging Equipment Task 1–7 Report.** *AEA Group.* *http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Final_Documents/Final-Report-EuP-Lot-3-17-Nov.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Andrae, A.S.G. & Andersen, O. (2010): **Life cycle assessments of consumer electronics — are they consistent?** *The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(8): 827–836, DOI: 10.1007/s11367-010-0206-1*

Baitz, M., Makishi Colodel, C., Kupfer, T., Florin, J., Schuller, O., Kokborg, M., Köhler, A., Thylmann, D., Stoffregen, A., Schöll, S., Görke, J., Rudolf, M. & Liedke, A. (2014): **GaBi Database & Modelling Principles 2014.** *http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/Modelling_Principles/GaBi_Modelling_Principles_2014.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Broehl-Kerner, H., Elander, M., Koch, M. & Vendramin, C. (2012): **Second Life - Wiederverwendung gebrauchter Elektro- und Elektronikgeräte.** *Umweltbundesamt.* *http://www.uba.de/uba-info-medien/4338.html [Zugriff 27.07.2015]*

EC (2010): **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance.** *European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, Publications Office of the European Union, Luxembourg, First edition, ISBN 978-92-79-19092-6*

EC (2011): **Energy Roadmap 2050.** *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Euopean Economic and Social Committe and the Committee of the Regions, 15.12.2011* **http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=EN** *[Zugriff 27.07.2015]*

EC (2012): **Working Document for the Ecodesign Consultation Forum on Sound and Imaging Equipment (ENTR Lot 3), 9. November 2012.** *European Commission, 4.10.2012* http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/WD_Lot_3__1_Discussion_Document.pdf *[Zugriff 27.07.2015]*

EU (1999): **Richtlinie 1999/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 1999 zu bestimmten Aspekten des Verbrauchsgüterkaufs und der Garantien für Verbrauchsgüter.** *Europäische Union, 7.07.1999* *http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0044:DE:HTML [Zugriff 27.07.2015]*

EU (2009): **Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.** *Europäische Union, 31.10.2009. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125&qid=1446395529816&from=EN [Zugriff 27.07.2015]*

EU (2011): **Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.** Europäische Union, 1.07.2011. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&qid=1446396008450&from=EN *[Zugriff 27.07.2015]*

EU (2012): **Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.** *Europäische Union, 24.07.2012. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&qid=1446395636202&from=EN [Zugriff 27.07.2015]*

Fichter, K., Beucker, S., Clausen, J. & Hintemann, R. (2009): **Green IT: Zukünftige Herausforderungen und Chancen.** *Umweltbundesamt.* *http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-it-zukuenftige-herausforderungen-chancen [Zugriff 27.07.2015]*

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. & Dorland, R. Van (2007): **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.** *In [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.)]: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 2, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA*

Förtsch, G. & Meinholz, H. (2015): **Handbuch Betriebliche Kreislaufwirtschaft.** *Springer Spektrum, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-06444-0*

Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2013): **ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition (version 1.08), Report I: Characterisation.** *http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet [Zugriff 27.07.2015]*

Griese, H., Poetter, H., Schischke, K., Ness, O., & Reichl, H. (2004): **Reuse and lifetime extension strategies in the context of technology innovations, global markets, and environmental legislation.** *In IEEE (ed.): Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004 IEEE International Symposium on, pp. 173-178, DOI: 10.1109/ISEE.2004.1299710*

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L.van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de & Duin, R. Van (2001): **Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards. Part 3 - Scientific Background, Final Report, May 2001.** *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, ISBN 1-4020-0228-9*

Hornbeck, L.J. (1998): **From cathode rays to digital micromirrors - A history of electronic projection display technology.** *http://focus.ti.com/download/dlpdmd/166_History_Electronic_Proj_Tech_Hornbeck.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

ISO 14040 (2006): **Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.** *Deutsches Institut für Normung e.V., November 2009*

JEMAI (2010): **Data Projector EH-DM30 (PCR-ID:AG-04).** *Japan Environmental Management Association for Industry. http://www.ecoleaf-jemai.jp/eng/pdf/AG_10_066_e.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Klöpffer, W. & Grahl, B. (2009): **Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf.** *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-32043-1*

Ligthart, T.N. & Ansems, T. (2012): **Modelling of Recycling in LCA.** *In Damanhuri, E. (ed.): Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production., Chapter 10, InTech, DOI: 10.5772/2642 http://www.intechopen.com/books/post-consumer-waste-recycling-and-optimal-production/modelling-of-recycling-in-lca [Zugriff 27.07.2015]*

Malmodin, J., Moberg, Å., Lundén, D., Finnveden, G. & Lövehagen, N. (2010): **Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in the ICT and Entertainment & Media Sectors.** *Journal of Industrial Ecology, 14(5):770–790. DOI:10.1111/j.1530-9290.2010.00278.x*

Müller, J. & Griese, H. (2007): **Green Electronics - Technische Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung.** *Initiative für nachhaltige Entwicklung: Themenreihe "Einstieg in nachhaltige Entwicklung VI", Juni 12, Berlin, Deutschland*

NEC Display Solutions GmbH (2009): **Desktop Projector NEC NP400 EDU.** *http://www.nec-display-solutions.com/p/download/cp/Products/Projectors/Products/SupportedProducts/NP400EDU/Datasheets/Datasheet-(german)_de.pdf?fn=NEC_Datasheet_NP400EDU-german.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

OECD (2010): **Materials Case Study 1: Critical Metals and Mobile Devices.** *OECD Environment Directorate. http://www.oecd.org/environment/waste/46133561.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Ökoinstitut (2012): **TOP 100 Einkaufshilfen für klimafreundliche Produkte - Beamer Produktinfos**. *http://www.ecotopten.de/sites/default/files/beamer-einkaufshilfe.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Ongondo, F.O., Williams, I.D. & Cherrett, T.J. (2011): **How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes.** *Waste Management, 31(4): 714–730, DOI:10.1016/j.wasman.2010.10.023*

Prakash, S., Liu, R., Schischke, K. & Stobbe, L. (2012): **Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten.** *Umweltbundesamt http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4316.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Prakash, S., Liu, R., Schischke, K., & Stobbe, L. (2013): **Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT).** *Umweltbundesamt http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schaffung-einer-datenbasis-zur-ermittlung [Zugriff 27.07.2015]*

Rebeam (2014): **Rebeam - Recycling & Recommerce.** *Wider die Verschwendung – Konkrete Schritte zur Abfallvermeidung, Mai 22, 2014, Berlin, Deutschland http://www.umweltbundesamt.de/dokument/poster-der-firma-rebeam-recycling-recommerce [Zugriff 27.07.2015]*

Ricardo-AEA (2013): **Impact Assessment Study for Sustainable Product Measures Lot 3 – Sound and Imaging Equipment.** *http://ec.europa.eu/enterprise/policies/sustainable-business/ecodesign/product-groups/sound-imaging/files/eco-sound-study-ricardo-aea_en.pdf [Zugriff 27.07.2015]*

Rotter, V.S., Ueberschaar, M., Geiping, J., Chancerel, P. & Flamme, S. (2015): **Recycling wirtschaftsstrategischer Metall aus Elektroaltgeräten - Ergebnisse aus dem Upgrade Projekt.** *In Thomé-Kozmiensky, K. J. & Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 249-267*

Sander, K., Schilling, S., Marschneider-Weidemann, F., Wilts, H., von Gries, N. & Hobohm, J. (2012): **Abfallwirtschaftlliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten - Meilensteinbericht August 2012.** *http://www.oekopol.de/de/themen/repro/publikationen.php [Zugriff 27.07.2015]*

Sanyo GmbH (2010): **Sanyo PLC-XD2200.** http://www.beamer-discount.de/beamer/sanyo/plc_xd2200/datenblatt_de_sanyo_plc_xd2200.pdf *[Zugriff 27.07.2015]*

Scheumann, R. & Becker, F. (2014): **Benefit of Re-use of IT Hardware for Society and Environment – a German Business Case.** *The 6th Living Knowledge Conference, April 9-11, Copenhagen, Denmark*

Schischke, K. & Griese, H. (2004): **Is small green? Life Cycle Aspects of Technology Trends in Microelectronics and Microsystems.** *The 4th InLCA/LCM 2004 On-Line Conference, July 11-24,* http://www.lcacenter.org/InLCA2004/papers/Schischke_K_paper.pdf *[Zugriff 27.07.2015]*

Seiko Epson Corp. (2011): **Epson EB-93e Projector Datasheet.** *http://www.epson.co.uk/gb/en/viewcon/corporatesite/products/mainunits/overview/10788 [Zugriff 27.07.2015]*

Sperlich, K., Oehme, I., Kraus, K., Süring, K., Gleis, M., Butz, W., Schnee, E., Lehmann, C., Friedrich, B., Krüger, F. & Mordziol, C. (2014): **Quecksilber in Umwelt und Produkten - Schwerpunkt Lampen.** *Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quecksilber-in-umwelt-produkten [Zugriff 27.07.2015]*

Walther, G., Steinborn, J., Spengler, T. S., Luger, T. & Herrmann, C. (2008): **Implementation of the WEEE-directive — economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany.** *Int J Adv Manuf Technol, (47): 461–474, DOI 10.1007/s00170-009-2243-0*

Webers, J. (2011): **Die Technik der audiovisuellen Medien - Film | Audio | Video, Band 2.** *Verlag C.H. Beck, Heidelberg, S.633-656, ISBN 978 3 82669135 5*

Anhang

A Neugeräte

Tab. 13 - Gewichtsangaben und Energieeffizienz zum Zeitpunkt der Studie auf dem Markt erhältlicher Projektoren

LCD-Projektoren	Gewicht [kg]	Licht-strom [lm]	Leistung Standby [W]	Leistung Normal [W]	Energie-effizienz [W/lm]
Epson EB X20[49]	2,6	2700	0,5	2700	0,100
Epson EB 98[44]	2,7	3000	0,5	281	0,094
Epson EB 93[44]	3,1	2400	0,4	337	0,140
Epson EB 93H[44]	3,1	2600	0,4	299	0,115
Epson EB S17[44]	2,5	2700	0,5	270	0,100
Canon LV-7292S[50]	2,8	2200	0,5	243	0,110
Canon LV-7292A[45]	3,0	2600	0,7	271	0,104
Sony VPL-DX122[51]	2,5	2600	0,5	289	0,111
Sony VPL-DX127[45]	2,6	2600	0,5	297	0,114
Sony VPL-DW127[45]	2,6	2600	0,5	301	0,116
Sony VPL-EW235[45]	3,9	2700	0,5	289	0,107
Panasonic PT-LB280[52]	2,8	2800	0,5	300	0,107
Durchschnitt Neugeräte	**2,9**	**2625**	**0,5**	**287**	**0,110**
Durchschnitt der Neugeräte im Vergleich zum Durchschnitt der Gebrauchtgeräte bei gleicher Helligkeit	**2,9**	**2400**	**0,5**	**264**	**0,110**
Durchschnitt Gebrauchsgeräte	**2,9**	**2400**	**4,0**	**268**	**0,111**

49 http://www.epson.co.uk/gb/en/viewcon/corporatesite/cms/index/1012 [Zugriff 27.07.2015]

50 http://www.canon.de/for_home/product_finder/multimedia_projectors/lv/ [Zugriff 27.07.2015]

51 http://www.sony.de/pro/products/projectors-home [Zugriff 27.07.2015]

52 http://panasonic.net/avc/projector/ [Zugriff 27.07.2015]

B Modellpläne aus GaBi 6.0

Abb. 23 - Produktlebenszyklus des Epson EB93

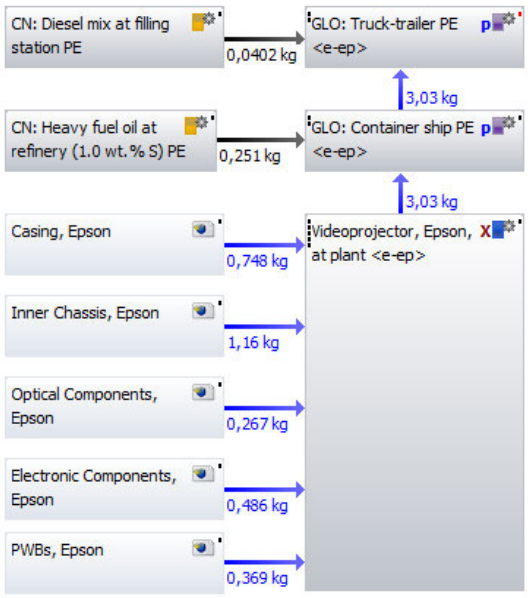

Abb. 24 - Produktion der Hauptkomponenten des Epson EB93

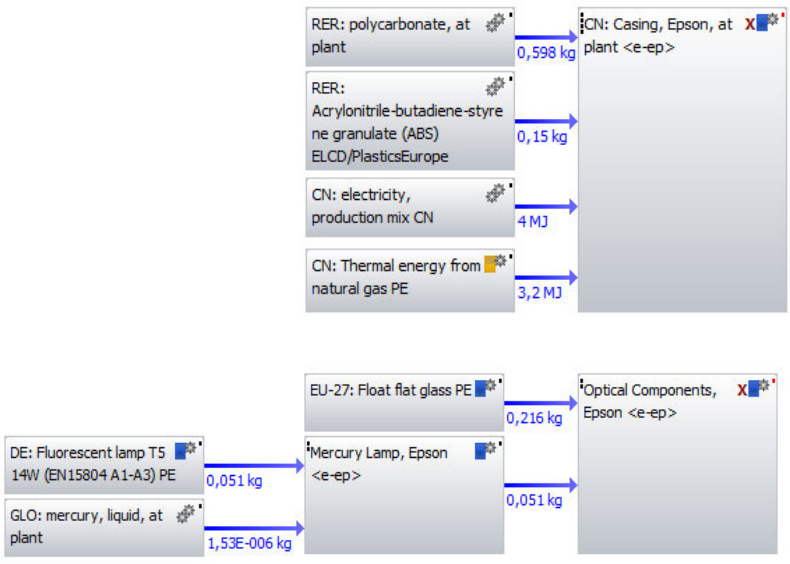

Abb. 25 - Produktion des Gehäuses und der Optischen Komponenten des Epson EB93

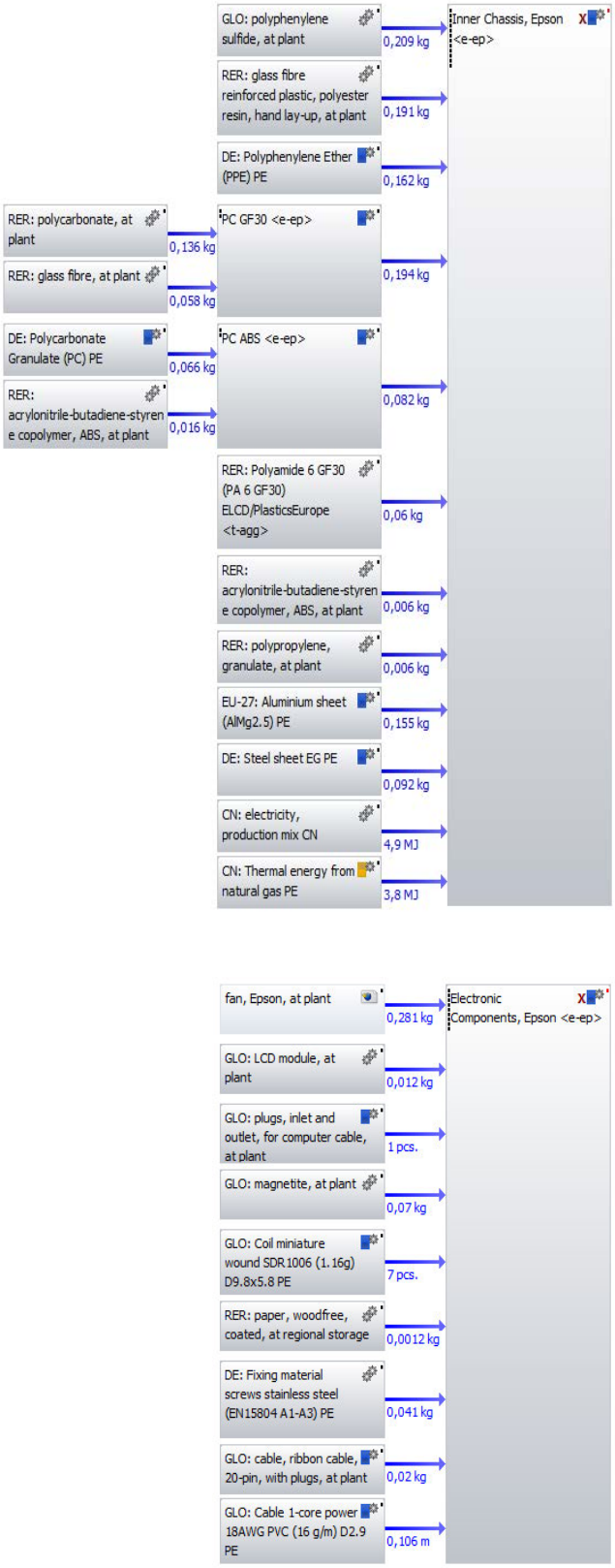

Abb. 26 - Produktion des Innengehäuses und der Elektronischen Komponenten des Epson EB93

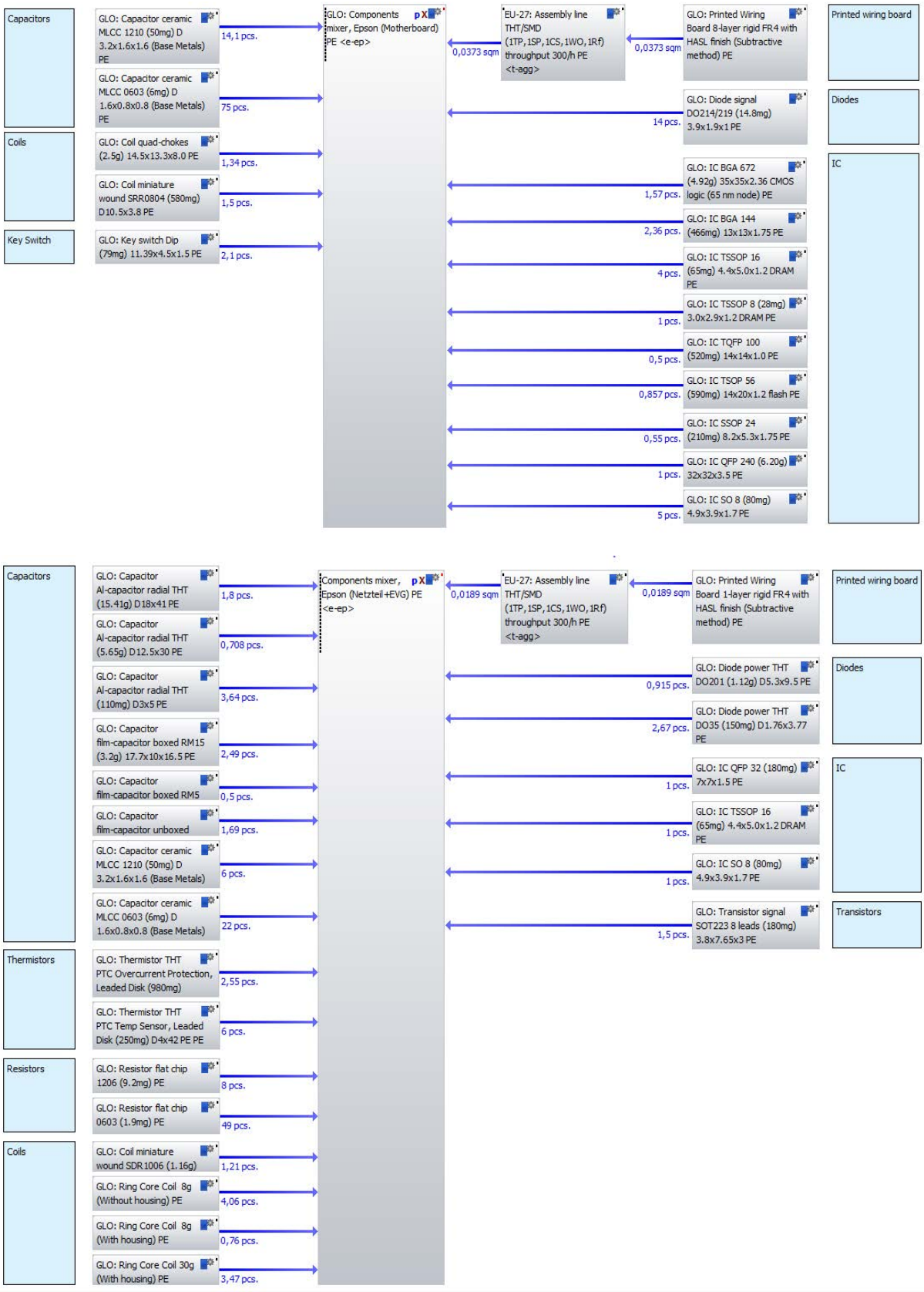

Abb. 27 - Produktion der Hauptplatine sowie EVG- und Netzfilterplatine des Epson EB93

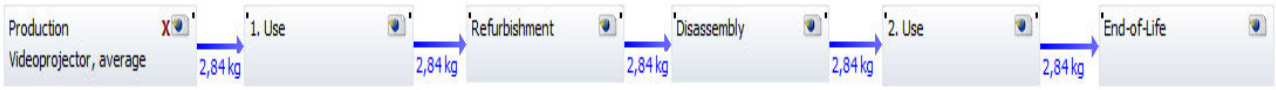

Abb. 28 - Lebenszyklus eines durchschnittlichen Projektors

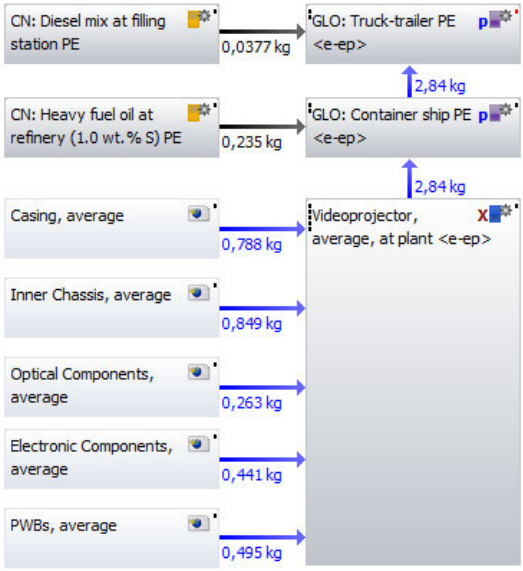

Abb. 29 - Produktion der Hauptkomponenten eines durchschnittlichen Projektors

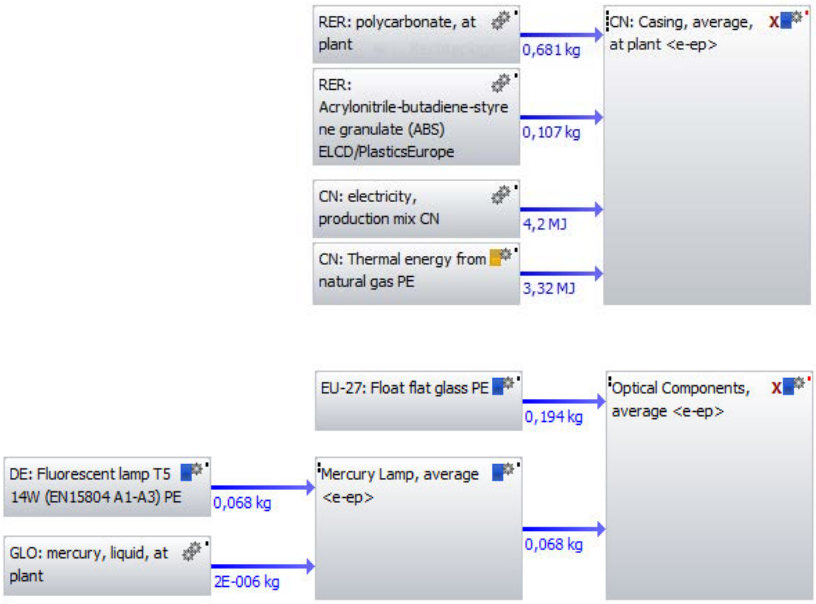

Abb. 30 - Produktion des Gehäuses und der Optischen Komponenten eines durchschnittlichen Projektors

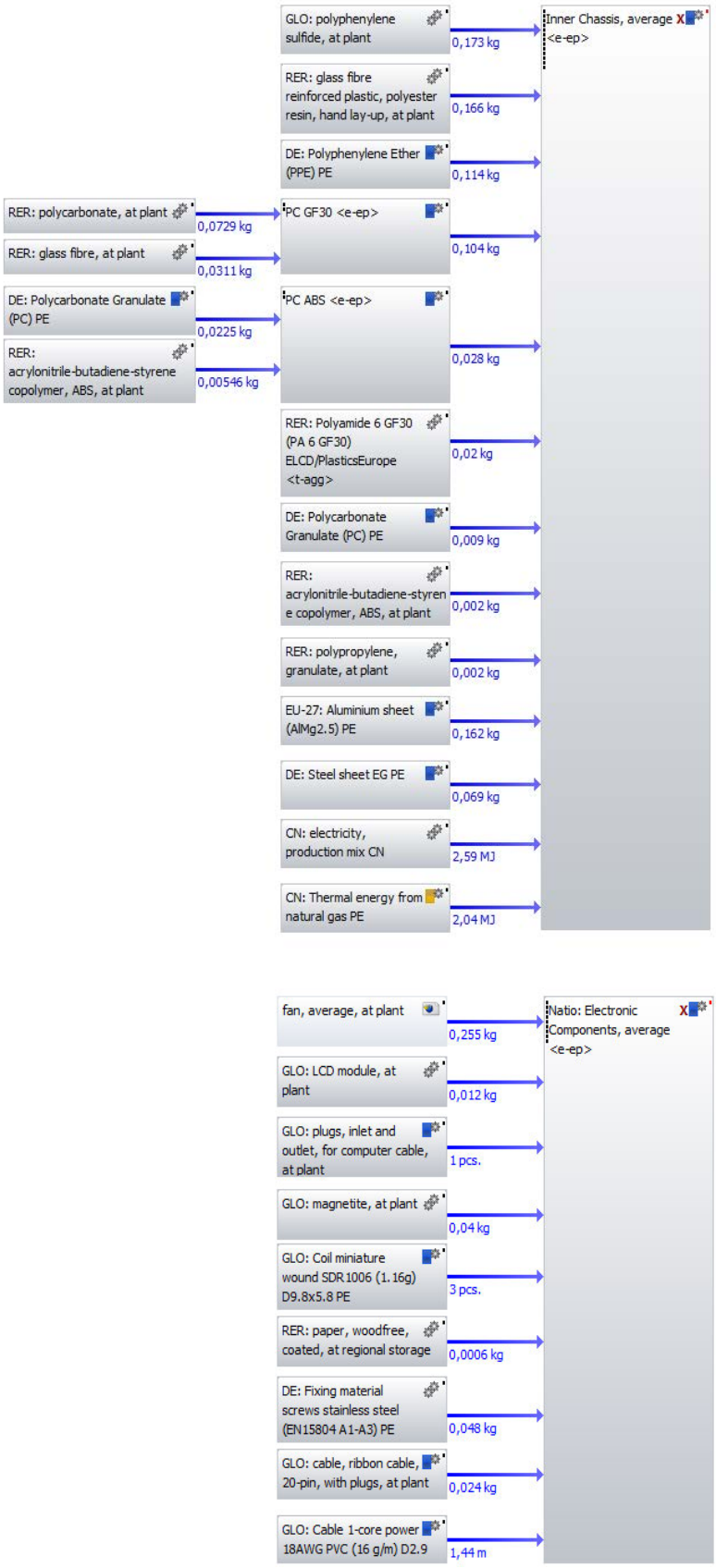

Abb. 31 - Produktion des Innengehäuses und der Elektronischen Komponenten eines durchschnittlichen Projektors

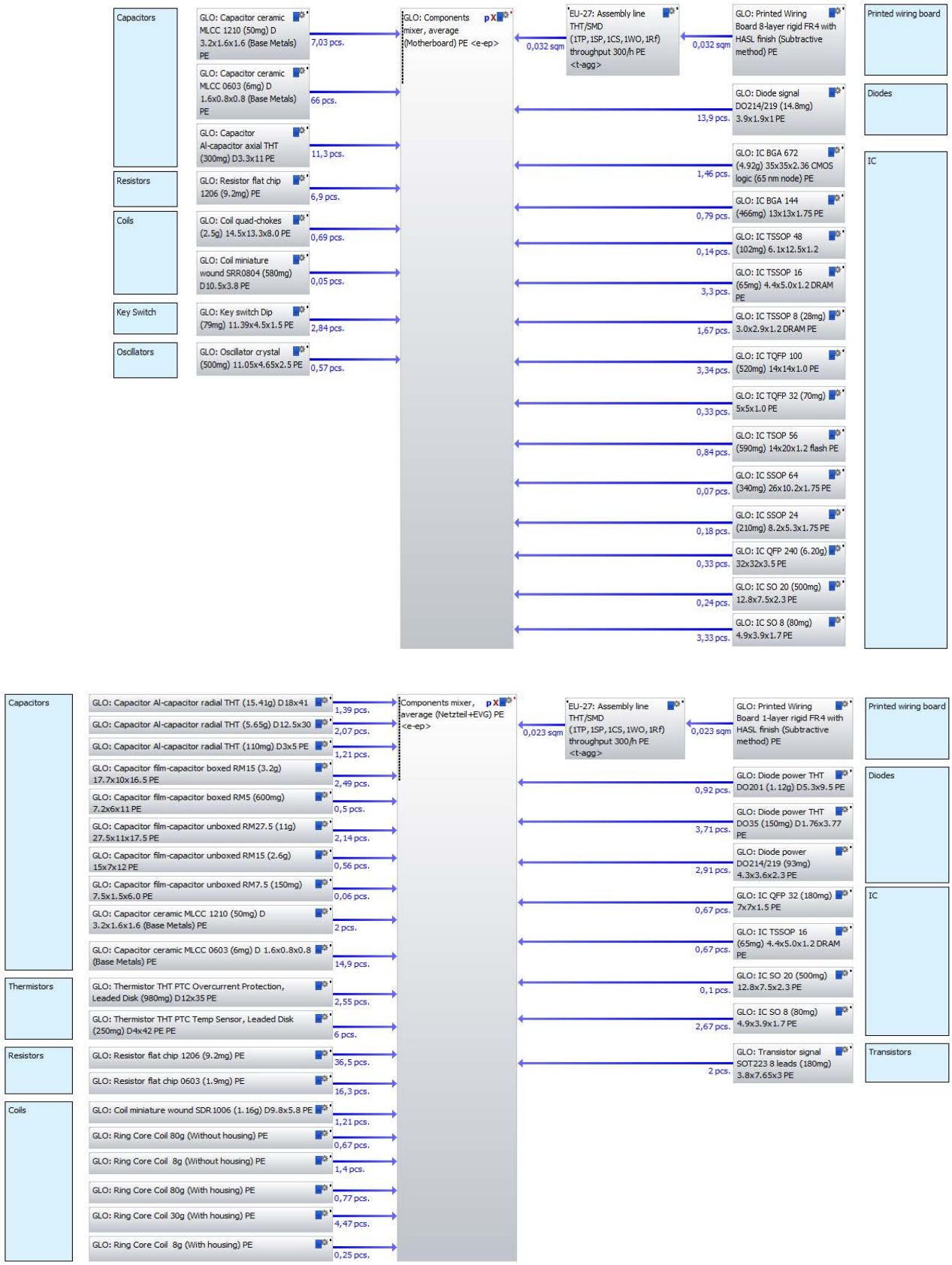

Abb. 32 - Produktion der Hauptplatine sowie EVG- und Netzfilterplatine eines durchschnittlichen Projektors

C Input/Output - Bilanzen

Tab. 14 - Midpoint-Wirkungsindikatoren (absolut) für die Produktion der Komponenten [Epson EB93]

ReCiPe 1.08. midpoint Epson EB93	Produktion total	Leiterplatten									Elektronische Komponenten						Optische Komponenten		Metalle		Plastik	Transport
		Unbestückte Leiterplatten	Integrierte Schaltung	Dioden	Transis-toren	Konden-satoren	Spulen	Wider-stände	Thermis-toren	DIP Schalter	Lüfter	Stecker	LCD-Panels	Laut-sprecher	Schrauben	Kabel	Gasentla-dungslampe	Linsen	Stahl-blech, IG	Aluminium-blech, IG	G + IG	China > EU
Klimawandel GWP [kg CO_2 eq]	**8.85E+01**	1.60E+01	5.04E+01	4.96E-01	1.32E-01	3.48E-01	1.54E+00	8.02E-03	6.51E-02	2.49E-03	9.39E-01	2.81E-01	7.12E-01	1.55E-01	3.01E-01	4.04E-01	1.59E-01	2.44E-01	2.02E-01	1.49E+00	1.35E+01	1.04E+00
Humantoxizität HTP [kg 1,4-DB eq]	**1.87E+01**	5.72E+00	3.25E+00	4.42E-02	1.15E-02	3.01E-02	2.43E-01	3.04E-03	1.34E-02	1.28E-03	9.05E-02	1.60E+00	1.89E+00	8.67E-02	3.60E-02	7.95E-01	1.41E+00	1.96E-01	1.05E-01	6.80E-02	3.09E+00	3.32E-02
Ionisierende Strahlung IRP [kg U^{235} eq]	**4.25E+00**	2.88E-01	2.65E+00	3.49E-02	9.57E-03	1.87E-02	3.70E-02	4.28E-04	2.18E-03	8.97E-05	2.10E-02	6.05E-02	2.05E-01	3.76E-02	6.46E-03	4.37E-02	6.91E-03	6.16E-03	1.47E-03	8.91E-02	7.31E-01	1.87E-04
Ozonabbau ODP [kg CFC-11 eq]	**2.51E-06**	3.90E-10	7.02E-09	9.74E-11	2.68E-11	8.10E-11	7.30E-11	4.17E-13	2.45E-12	2.76E-12	2.54E-09	4.87E-08	5.25E-08	4.13E-09	1.18E-11	2.52E-08	6.26E-11	2.15E-11	1.94E-12	4.14E-10	2.36E-06	6.63E-14
Feinstaubbildung PMFP [kg PM10 eq]	**1.80E-01**	4.62E-02	9.01E-02	7.61E-04	1.95E-04	6.02E-04	2.10E-03	2.88E-05	2.57E-04	7.84E-06	1.52E-03	1.01E-03	1.32E-03	4.05E-04	6.06E-04	1.25E-03	4.54E-04	1.45E-03	2.91E-04	2.71E-03	2.09E-02	8.14E-03
Photochemische Oxidation POFP [kg NMVOC]	**3.35E-01**	8.50E-02	1.66E-01	1.28E-03	3.30E-04	1.04E-03	4.28E-03	2.08E-05	2.13E-04	7.89E-06	2.91E-03	1.44E-03	2.69E-03	5.49E-04	9.01E-04	1.69E-03	5.65E-04	4.37E-04	5.87E-04	4.00E-03	3.81E-02	2.36E-02
Terrestrische Ökotoxizität TETP [kg 1,4-DB eq]	**1.03E-02**	2.65E-03	2.04E-03	2.27E-05	5.16E-06	1.29E-05	2.91E-04	9.35E-07	5.44E-06	5.65E-07	3.17E-05	1.24E-03	1.05E-03	6.47E-05	5.59E-05	6.39E-04	4.43E-04	4.84E-04	8.07E-06	2.97E-05	1.19E-03	2.76E-06
Frischwasser Ökotoxizität FETP [kg 1,4-DB eq]	**2.78E-01**	3.63E-02	4.24E-02	9.12E-05	2.42E-05	8.45E-05	1.13E-03	3.82E-06	2.81E-05	1.56E-06	1.62E-03	2.82E-02	7.42E-02	1.66E-03	1.01E-04	1.20E-02	4.97E-05	3.94E-04	4.18E-05	2.09E-04	7.93E-02	2.17E-04
Seewasser Ökotoxizität METP [kg 1,4-DB eq]	**2.55E-01**	3.38E-02	5.19E-02	2.84E-04	5.86E-05	1.84E-04	5.00E-03	1.40E-05	7.30E-05	9.28E-06	1.84E-03	2.85E-02	6.28E-02	1.84E-03	1.48E-03	1.44E-02	3.17E-03	1.18E-03	2.06E-04	4.01E-04	4.81E-02	3.03E-04
Terrestrische Versauerung TAP [kg SO_2 eq]	**5.02E-01**	1.02E-01	2.83E-01	2.30E-03	5.91E-04	1.30E-03	4.75E-03	7.75E-05	2.74E-04	3.16E-05	4.84E-03	2.67E-03	4.12E-03	1.36E-03	1.77E-03	3.46E-03	7.17E-04	1.31E-03	6.37E-04	6.76E-03	5.47E-02	2.62E-02
Eutrophierung, Frischwasser FEP [kg P eq]	**3.97E-03**	3.11E-04	2.74E-05	3.75E-07	1.04E-07	5.45E-07	5.46E-06	2.72E-08	2.13E-07	6.76E-09	5.62E-05	7.98E-04	9.05E-04	4.99E-05	2.57E-07	3.39E-04	2.31E-07	1.34E-07	3.05E-07	7.70E-07	1.48E-03	1.12E-07
Eutrophierung, Seewasser MEP [kg N eq]	**1.87E-02**	4.67E-03	7.43E-03	7.82E-05	2.10E-05	3.90E-05	1.99E-04	8.42E-07	7.05E-06	3.28E-07	1.10E-04	1.14E-04	2.97E-03	3.41E-05	3.66E-05	1.06E-04	3.10E-05	7.33E-05	2.39E-05	1.50E-04	1.76E-03	8.84E-04
Natürliche Landumwandlung NLTP [m^2]	**6.97E-04**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.83E-05	8.71E-05	1.49E-04	9.76E-06	0	4.72E-05	1.78E-07	0	0	0	3.76E-04	0
Landwirtschaftliche Landnutzung ALOP [m^2a]	**8.77E-01**	2.93E-01	2.93E-01	4.00E-03	9.00E-04	2.12E-03	1.15E-02	6.69E-05	4.77E-04	2.21E-05	1.41E-02	5.73E-02	2.95E-02	8.61E-03	1.43E-03	2.87E-02	1.09E-03	6.74E-04	8.17E-04	8.54E-03	1.19E-01	9.41E-04
Urbane Landnutzung ULOP [m^2a]	**6.24E-02**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.68E-03	7.25E-03	1.17E-02	4.96E-04	0	2.92E-03	6.17E-07	0	0	0	3.64E-02	0
Verbrauch fossiler Rohstoffe FDP [kg oil eq]	**2.55E+01**	4.21E+00	1.41E+01	1.36E-01	3.61E-02	1.14E-01	5.42E-01	2.51E-03	2.06E-02	8.39E-04	5.35E-01	1.04E-01	1.74E-01	4.63E-02	8.01E-02	1.40E-01	4.85E-02	6.86E-02	5.50E-02	3.85E-01	4.36E+00	3.27E-01
Verbrauch von Metallen MDP [kg Fe eq]	**3.32E+01**	1.46E+01	9.69E+00	7.44E-02	6.71E-03	6.86E-02	3.99E+00	1.19E-02	4.17E-02	7.18E-03	1.17E-01	4.64E-01	2.88E-01	3.14E-01	1.23E+00	1.65E+00	5.73E-02	6.05E-03	2.04E-01	2.17E-01	1.40E-01	4.94E-04
Verbrauch von Wasser WDP [m^3]	**1.00E+02**	1.19E+01	4.77E+01	6.32E-01	1.70E-01	1.67E+00	8.72E-01	9.49E-03	5.12E-02	2.30E-03	7.08E-01	2.01E+00	2.92E+00	4.77E-01	3.09E-01	1.72E+00	3.68E-01	1.04E-01	5.17E-02	1.77E+01	1.10E+01	1.89E-02

G = Gehäuse	eq = Äquivalent	E+01 = x 10^1 ; E-06 = x 10^{-6}	CO_2: Carbon dioxide	Fe: Iron	P: Phosphate	PM 10: Particulate Matter	U^{235}: Uranium 235
IG = Innengehäuse	m^2a = Quadratmeter pro Jahr	1,4-DB: 1,4 Dichlorobenzene	CFC-11: Chlorofluorocarbon	N: Nitrate	NMVOC: Non Methane Volatile Organic Carbon		SO_2: Sulphur Dioxide

Tab. 15 - Midpoint-Wirkungsindikatoren (relativ) für die Produktion der Komponenten [Epson EB93]

ReCiPe 1.08. midpoint Epson EB93	Produktion total	Leiterplatten									Elektronische Komponenten						Optische Komponenten		Metalle		Plastik	Transport
		Unbestückte Leiterplatten	Integrierte Schaltung	Dioden	Transis-toren	Konden-satoren	Spulen	Wider-stände	Thermis-toren	DIP Schalter	Lüfter	Stecker	LCD-Panels	Laut-sprecher	Schrauben	Kabel	Gasentla-dungslampe	Linsen	Stahl-blech, IG	Aluminium-blech, IG	G + IG	China > EU
Klimawandel GWP [kg CO_2 eq]	100.0%	18.1%	**57.0%**	0.6%	0.1%	0.4%	1.7%	0.0%	0.1%	0.0%	1.1%	0 3%	0.8%	0 2%	0.3%	0.5%	0.2%	0.3%	0.2%	1.7%	15.3%	1.2%
Humantoxizität HTP [kg 1,4-DB eq]	100.0%	**30.6%**	17.4%	0.2%	0.1%	0.2%	1 3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.5%	8 5%	10.1%	0 5%	0.2%	4.2%	7.5%	1.0%	0.6%	0.4%	16.5%	0.2%
Ionisierende Strahlung IRP [kg U^{235} eq]	100.0%	6 8%	**62.3%**	0.8%	0.2%	0.4%	0 9%	0.0%	0.1%	0.0%	0.5%	1.4%	4.8%	0 9%	0.2%	1.0%	0.2%	0.1%	0 0%	2.1%	17.2%	0.0%
Ozonabbau ODP [kg CFC-11 eq]	100.0%	0 0%	0 3%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.9%	2.1%	0 2%	0.0%	1.0%	0.0%	0 0%	0 0%	0.0%	**94.4%**	0.0%
Feinstaubbildung PMFP [kg PM10 eq]	100.0%	25.6%	**50.0%**	0.4%	0.1%	0.3%	1 2%	0.0%	0.1%	0.0%	0.8%	0.6%	0.7%	0 2%	0.3%	0.7%	0.3%	0.8%	0.2%	1.5%	11.6%	4.5%
Photochemische Oxidation POFP [kg NMVOC]	100.0%	25.3%	**49.4%**	0.4%	0.1%	0.3%	1 3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.9%	0.4%	0.8%	0 2%	0.3%	0.5%	0.2%	0.1%	0.2%	1.2%	11.4%	7.1%
Terrestrische Ökotoxizität TETP [kg 1,4-DB eq]	100.0%	**25.8%**	19 9%	0.2%	0.1%	0.1%	2 8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.3%	12.1%	10.2%	0.6%	0.5%	6.2%	4.3%	4.7%	0.1%	0.3%	11.6%	0.0%
Frischwasser Ökotoxizität FETP [kg 1,4-DB eq]	100.0%	13.0%	15 3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	10.1%	26.7%	0.6%	0.0%	4.3%	0.0%	0.1%	0 0%	0.1%	**28.5%**	0.1%
Seewasser Ökotoxizität METP [kg 1,4-DB eq]	100.0%	13.2%	20 3%	0.1%	0.0%	0.1%	2 0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	11.1%	**24.6%**	0.7%	0.6%	5.6%	1.2%	0.5%	0.1%	0.2%	18.8%	0.1%
Terrestrische Versauerung TAP [kg SO_2 eq]	100.0%	20.2%	**56.3%**	0.5%	0.1%	0.3%	0 9%	0.0%	0.1%	0.0%	1.0%	0 5%	0.8%	0 3%	0.4%	0.7%	0.1%	0.3%	0.1%	1.3%	10.9%	5.2%
Eutrophierung, Frischwasser FEP [kg P eq]	100.0%	7 8%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	20.1%	22.8%	1 3%	0.0%	8.5%	0.0%	0 0%	0 0%	0.0%	**37.2%**	0.0%
Eutrophierung, Seewasser MEP [kg N eq]	100.0%	24.9%	**39.6%**	0.4%	0.1%	0.2%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.6%	15.8%	0 2%	0.2%	0.6%	0.2%	0.4%	0.1%	0.8%	9.4%	4.7%
Natürliche Landumwandlung NLTP [m^2]	100.0%	0 0%	0 0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.1%	12.5%	21.4%	1.4%	0.0%	6.8%	0.0%	0 0%	0 0%	0.0%	53.9%	0.0%
Landwirtschaftliche Landnutzung ALOP [m^2a]	100.0%	**33.5%**	33.4%	0.5%	0.1%	0.2%	1 3%	0.0%	0.1%	0.0%	1.6%	6 5%	3.4%	1 0%	0.2%	3.3%	0.1%	0.1%	0.1%	1.0%	13.6%	0.1%
Urbane Landnutzung ULOP [m^2a]	100.0%	0 0%	0 0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.9%	11.6%	18.7%	0 8%	0.0%	4.7%	0.0%	0 0%	0 0%	0.0%	58.3%	0.0%
Verbrauch fossiler Rohstoffe FDP [kg oil eq]	100.0%	16.5%	**55.3%**	0.5%	0.1%	0.4%	2.1%	0.0%	0.1%	0.0%	2.1%	0.4%	0.7%	0 2%	0.3%	0.5%	0.2%	0.3%	0.2%	1.5%	17.1%	1.3%
Verbrauch von Metallen MDP [kg Fe eq]	100.0%	**44.0%**	29 2%	0.2%	0.0%	0.2%	12 0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.4%	1.4%	0.9%	0 9%	3.7%	5.0%	0.2%	0.0%	0.6%	0.7%	0.4%	0.0%
Verbrauch von Wasser WDP [m^3]	100.0%	11.8%	**47.5%**	0.6%	0.2%	1.7%	0 9%	0.0%	0.1%	0.0%	0.7%	2 0%	2.9%	0 5%	0.3%	1.7%	0.4%	0.1%	0.1%	17.6%	11 0%	0.0%

G = Gehäuse	eq = Äquivalent	E+01 = x 10^1 ; E-06 = x 10^{-6}	CO_2: Carbon dioxide	Fe: Iron	P: Phosphate	PM 10: Particulate Matter	U^{235}: Uranium 235
IG = Innengehäuse	m^2a = Quadratmeter pro Jahr	1,4-DB: 1,4 Dichlorobenzene	CFC-11: Chlorofluorocarbon	N: Nitrate	NMVOC: Non Methane Volatile Organic Carbon		SO_2: Sulphur Dioxide

Tab. 16 - Midpoint-Wirkungsindikatoren (absolut) für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors

ReCiPe 1.08. midpoint Durchschnitt (n=3)	Produktion total	Leiterplatten										Elektronische Komponenten						Optische Komponenten		Metalle		Plastik	Transport
		Unbestückte Leiterplatten	Integrierte Schaltung	Dioden	Transis-toren	Konden-satoren	Spulen	Wider-stände	Thermis-toren	DIP Schalter	Oszil-latoren	Lüfter	Stecker	LCD-Panels	Laut-sprecher	Schrauben	Kabel	Gasentla-dungslampe	Linsen	Stahl-blech, IG	Aluminium-blech, IG	G + IG	China > EU
Klimawandel GWP [kg CO_2 eq]	**8.07E+01**	1.45E+01	4.53E+01	6.66E-01	1.76E-01	4.86E-01	2.16E+00	2.04E-02	6.51E-02	3.37E-03	5.10E-03	8.37E-01	2.81E-01	7.12E-01	7.45E-02	3.52E-01	3.12E-01	2.12E-01	2.19E-01	1.52E-01	1.55E+00	1.16E+01	9.77E-01
Humantoxizität HTP [kg 1,4-DB eq]	**1.63E+01**	5.28E+00	2.87E+00	5.90E-02	1.53E-02	5.00E-02	4.03E-01	7.83E-03	1.34E-02	1.74E-03	6.79E-04	7.97E-02	1.60E+00	1.89E+00	4.42E-02	4.22E-02	8.90E-01	1.04E-01	1.76E-01	7.88E-02	7.11E-02	2.61E+00	3.11E-02
Ionisierende Strahlung IRP [kg U^{235} eq]	**3.75E+00**	2.66E-01	2.27E+00	4.71E-02	1.28E-02	2.68E-02	6.50E-02	1.07E-03	2.18E-03	1.21E-04	2.04E-04	1.87E-02	6.05E-02	2.05E-01	2.09E-02	7.57E-03	5.04E-02	9.21E-03	5.53E-03	1.10E-03	9.32E-02	5.90E-01	1.75E-04
Ozonabbau ODP [kg CFC-11 eq]	**2.48E-06**	3.71E-10	6.02E-09	1.32E-10	3.57E-11	1.20E-10	1.31E-10	1.04E-12	2.45E-12	3.73E-12	1.96E-13	2.22E-09	4.87E-08	5.25E-08	2.35E-09	1.38E-11	3.02E-08	2.62E-11	1.93E-11	1.46E-12	4.32E-10	2.33E-06	6.22E-14
Feinstaubbildung PMFP [kg PM10 eq]	**1.66E-01**	4.19E-02	8.26E-02	1.02E-03	2.60E-04	7.66E-04	2.94E-03	7.43E-05	2.57E-04	1.06E-05	2.58E-05	1.34E-03	1.01E-03	1.32E-03	1.85E-04	7.10E-04	9.33E-04	6.05E-04	1.30E-03	2.18E-04	2.84E-03	1.78E-02	7.63E-03
Photochemische Oxidation POFP [kg NMVOC]	**3.11E-01**	7.71E-02	1.55E-01	1.71E-03	4.40E-04	1.43E-03	5.76E-03	5.33E-05	2.13E-04	1.07E-05	1.02E-05	2.58E-03	1.44E-03	2.69E-03	2.55E-04	1.06E-03	1.35E-03	7.52E-04	3.93E-04	4.40E-04	4.19E-03	3.23E-02	2.22E-02
Terrestrische Ökotoxizität TETP [kg 1,4-DB eq]	**9.47E-03**	2.42E-03	1.86E-03	3.00E-05	6.88E-06	1.96E-05	5.02E-04	2.41E-06	5.44E-06	7.65E-07	2.27E-07	2.82E-05	1.24E-03	1.05E-03	3.34E-05	6.54E-05	6.84E-04	3.95E-05	4.35E-04	6.05E-06	3.11E-05	1.01E-03	2.59E-06
Frischwasser Ökotoxizität FETP [kg 1,4-DB eq]	**2.63E-01**	3.37E-02	4.08E-02	1.22E-04	3.22E-05	1.09E-04	1.97E-03	9.78E-06	2.81E-05	2.11E-06	2.47E-06	1.42E-03	2.82E-02	7.42E-02	9.35E-04	1.18E-04	1.43E-02	4.76E-05	3.53E-04	3.13E-05	2.19E-04	6.64E-02	2.04E-04
Seewasser Ökotoxizität METP [kg 1,4-DB eq]	**2.43E-01**	3.08E-02	4.90E-02	3.71E-04	7.81E-05	2.78E-04	8.68E-03	3.62E-05	7.30E-05	1.25E-05	2.02E-06	1.62E-03	2.85E-02	6.28E-02	9.92E-04	1.73E-03	1.59E-02	3.64E-04	1.06E-03	1.54E-04	4.19E-04	3.97E-02	2.84E-04
Terrestrische Versauerung TAP [kg SO_2 eq]	**4.62E-01**	9.23E-02	2.61E-01	3.08E-03	7.88E-04	1.76E-03	6.70E-03	2.00E-04	2.74E-04	4.28E-05	6.07E-06	4.26E-03	2.67E-03	4.12E-03	6.15E-04	2.07E-03	2.65E-03	9.54E-04	1.18E-03	4.78E-04	7.07E-03	4.55E-02	2.45E-02
Eutrophierung, Frischwasser FEP [kg P eq]	**3.72E-03**	2.89E-04	2.34E-05	5.05E-07	1.38E-07	7.00E-07	9.69E-06	6.96E-08	2.13E-07	9.14E-09	2.09E-08	4.91E-05	7.98E-04	9.05E-04	2.84E-05	3.01E-07	4.07E-04	2.91E-07	1.20E-07	2.29E-07	8.05E-07	1.21E-03	1.05E-07
Eutrophierung, Seewasser MEP [kg N eq]	**1.74E-02**	4.27E-03	6.83E-03	1.05E-04	2.79E-05	5.31E-05	2.84E-04	2.14E-06	7.05E-06	4.44E-07	3.88E-07	9.79E-05	1.14E-04	2.97E-03	1.70E-05	4.29E-05	9.42E-05	4.13E-05	6.59E-05	1.79E-05	1.57E-04	1.36E-03	8.29E-04
Natürliche Landumwandlung NLTP [m^2]	**6.18E-04**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.47E-05	8.71E-05	1.49E-04	5.50E-06	0	5.66E-05	1.19E-08	0	0	0	2.95E-04	0
Landwirtschaftliche Landnutzung ALOP [m^2a]	**7.86E-01**	2.66E-01	2.55E-01	5.27E-03	1.20E-03	2.78E-03	1.61E-02	1.69E-04	4.77E-04	2.99E-05	2.41E-05	1.24E-02	5.73E-02	2.95E-02	4.36E-03	1.68E-03	2.83E-02	1.45E-03	6.05E-04	6.13E-04	8.93E-03	9.26E-02	8.83E-04
Urbane Landnutzung ULOP [m^2a]	**5.44E-02**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.21E-03	7.25E-03	1.17E-02	2.77E-04	0	3.51E-03	4.11E-08	0	0	0	2.85E-02	0
Verbrauch fossiler Rohstoffe FDP [kg oil eq]	**2.30E+01**	3.82E+00	1.25E+01	1.82E-01	4.81E-02	1.60E-01	7.67E-01	6.39E-03	2.06E-02	1.13E-03	1.69E-03	4.82E-01	1.04E-01	1.74E-01	2.21E-02	9.37E-02	1.12E-01	6.46E-02	6.16E-02	4.12E-02	4.02E-01	3.64E+00	3.07E-01
Verbrauch von Metallen MDP [kg Fe eq]	**3.54E+01**	1.32E+01	1.09E+01	9.25E-02	8.95E-03	1.13E-01	7.14E+00	3.06E-02	4.17E-02	9.71E-03	4.53E-04	1.06E-01	4.64E-01	2.88E-01	1.36E-01	1.44E+00	8.51E-01	7.65E-02	5.44E-03	1.53E-01	2.26E-01	1.13E-01	4.63E-04
Verbrauch von Wasser WDP [m^3]	**9.29E+01**	1.09E+01	4.10E+01	8.51E-01	2.27E-01	2.46E+00	1.43E+00	2.37E-02	5.12E-02	3.11E-03	4.23E-03	6.24E-01	2.01E+00	2.92E+00	2.55E-01	3.62E-01	1.98E+00	4.91E-01	9.38E-02	3.87E-02	1.85E+01	8.73E+00	1.77E-02

G = Gehäuse	eq = Äquivalent	E+01 = x 10^1 ; E-06 = x 10^{-6}	CO_2: Carbon dioxide	Fe: Iron	P: Phosphate	PM 10: Particulate Matter	U^{235}: Uranium 235
IG = Innengehäuse	m^2a = Quadratmeter pro Jahr	1,4-DB: 1,4 Dichlorobenzene	CFC-11: Chlorofluorocarbon	N: Nitrate	NMVOC: Non Methane Volatile Organic Carbon		SO_2: Sulphur Dioxide

Tab. 17 - Midpoint-Wirkungsindikatoren (relativ) für die Produktion der Komponenten eines durchschnittlichen Projektors

ReCiPe 1.08. midpoint Durchschnitt (n=3)	Produktion total	Leiterplatten										Elektronische Komponenten						Optische Komponenten		Metalle		Plastik	Transport
		Unbestückte Leiterplatten	Integrierte Schaltung	Dioden	Transis-toren	Konden-satoren	Spulen	Wider-stände	Thermis-toren	DIP Schalter	Oszil-latoren	Lüfter	Stecker	LCD-Panels	Laut-sprecher	Schrauben	Kabel	Gasentla-dungslampe	Linsen	Stahl-blech, IG	Aluminium-blech, IG	G + IG	China > EU
Klimawandel GWP [kg CO_2 eq]	**100.0%**	18.0%	**56.2%**	0.8%	0.2%	0.6%	2.7%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	1.0%	0.3%	0.9%	0.1%	0.4%	0.4%	0.3%	0 3%	0.2%	1.9%	14.3%	1 2%
Humantoxizität HTP [kg 1,4-DB eq]	**100.0%**	**32.4%**	17.6%	0.4%	0.1%	0.3%	2.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.5%	9.8%	11.6%	0 3%	0.3%	5.5%	0.6%	1.1%	0.5%	0.4%	16.0%	0 2%
Ionisierende Strahlung IRP [kg U^{235} eq]	**100.0%**	7.1%	**60.4%**	1.3%	0.3%	0.7%	1.7%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.5%	1.6%	5.5%	0.6%	0.2%	1.3%	0.2%	0.1%	0.0%	2.5%	15.7%	0 0%
Ozonabbau ODP [kg CFC-11 eq]	**100.0%**	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	0.1%	2.0%	2.1%	0.1%	0.0%	1.2%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	**94.2%**	0 0%
Feinstaubbildung PMFP [kg PM10 eq]	**100.0%**	25.3%	**49.8%**	0.6%	0.2%	0.5%	1.8%	0.0%	0 2%	0.0%	0 0%	0.8%	0.6%	0.8%	0.1%	0.4%	0.6%	0.4%	0 8%	0.1%	1.7%	10.8%	4.6%
Photochemische Oxidation POFP [kg NMVOC]	**100.0%**	24.8%	**49.8%**	0.5%	0.1%	0.5%	1.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.8%	0.5%	0.9%	0.1%	0.3%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	1.3%	10.4%	7.1%
Terrestrische Ökotoxizität TETP [kg 1,4-DB eq]	**100.0%**	**25.5%**	19.7%	0.3%	0.1%	0.2%	5.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.3%	13.1%	11.1%	0.4%	0.7%	7.2%	0.4%	4.6%	0.1%	0.3%	10.6%	0 0%
Frischwasser Ökotoxizität FETP [kg 1,4-DB eq]	**100.0%**	12.8%	15.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	0.5%	10.7%	**28.2%**	0.4%	0.0%	5.4%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	25.2%	0.1%
Seewasser Ökotoxizität METP [kg 1,4-DB eq]	**100.0%**	12.7%	20.2%	0.2%	0.0%	0.1%	3.6%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	0.7%	11.7%	**25.9%**	0.4%	0.7%	6.5%	0.1%	0.4%	0.1%	0.2%	16.4%	0.1%
Terrestrische Versauerung TAP [kg SO_2 eq]	**100.0%**	20.0%	**56.4%**	0.7%	0.2%	0.4%	1.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.9%	0.6%	0.9%	0.1%	0.4%	0.6%	0.2%	0 3%	0.1%	1.5%	9 8%	5 3%
Eutrophierung, Frischwasser FEP [kg P eq]	**100.0%**	7.8%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	1.3%	21.4%	24.3%	0 8%	0.0%	10.9%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	**32.5%**	0 0%
Eutrophierung, Seewasser MEP [kg N eq]	**100.0%**	24.5%	**39.3%**	0.6%	0.2%	0.3%	1.6%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	0.6%	0.7%	17.1%	0.1%	0.2%	0.5%	0.2%	0.4%	0.1%	0.9%	7 8%	4 8%
Natürliche Landumwandlung NLTP [m^2]	**100.0%**	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	4.0%	14.1%	24.1%	0 9%	0.0%	9.2%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	47.8%	0 0%
Landwirtschaftliche Landnutzung ALOP [m^2a]	**100.0%**	**33.9%**	32.4%	0.7%	0.2%	0.4%	2.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	1.6%	7.3%	3.8%	0.6%	0.2%	3.6%	0.2%	0.1%	0.1%	1.1%	11.8%	0.1%
Urbane Landnutzung ULOP [m^2a]	**100.0%**	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0 0%	0.0%	0 0%	5.9%	13.3%	21.4%	0 5%	0.0%	6.4%	0.0%	0 0%	0.0%	0.0%	52.4%	0 0%
Verbrauch fossiler Rohstoffe FDP [kg oil eq]	**100.0%**	16.6%	**54.3%**	0.8%	0.2%	0.7%	3.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	2.1%	0.5%	0.8%	0.1%	0.4%	0.5%	0.3%	0 3%	0.2%	1.7%	15.8%	1 3%
Verbrauch von Metallen MDP [kg Fe eq]	**100.0%**	**37.4%**	30.7%	0.3%	0.0%	0.3%	20.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0 0%	0.3%	1.3%	0.8%	0.4%	4.1%	2.4%	0.2%	0 0%	0.4%	0.6%	0 3%	0 0%
Verbrauch von Wasser WDP [m^3]	**100.0%**	11.7%	**44.1%**	0.9%	0.2%	2.6%	1.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0 0%	0.7%	2.2%	3.1%	0 3%	0.4%	2.1%	0.5%	0.1%	0.0%	19 9%	9.4%	0 0%

G = Gehäuse	eq = Äquivalent	E+01 = x 10^1 ; E-06 = x 10^{-6}	CO_2: Carbon dioxide	Fe: Iron	P: Phosphate	PM 10: Particulate Matter	U^{235}: Uranium 235
IG = Innengehäuse	m^2a = Quadratmeter pro Jahr	1,4-DB: 1,4 Dichlorobenzene	CFC-11: Chlorofluorocarbon	N: Nitrate	NMVOC: Non Methane Volatile Organic Carbon		SO_2: Sulphur Dioxide

Comparative case study re-using video projectors - A question of allocation and energy transition

Chui Wan Cheung

Abstract

Purpose The current focus of environmental legislation for energy using products (EuP) is efficient energy consumption in the use stage. However, the production and waste treatment of electronic products are related to environmental impacts in terms of declining metal resources and growing waste streams. This paper investigates the environmental impacts of life time extension versus energy efficiency for the product group video projector using Life Cycle Assessment (LCA).

Methods A case study of lifetime extension was conducted by analysing the process of reconditioning for reuse of an average LCD projector based on primary data. The functional unit was defined as projected audiovisual content for the duration investigated. Avoided impacts of primary products due to life time extension were quantified to account for secondary functions provided using the substitution approach. Life cycle impacts of progression in life cycles for reconditioned devices were compared to energy efficiency increase of 5% and 10% for primary successors. Significant contributions of both projector components and life cycle stages were identified. Furthermore, the amortization period of production emissions was quantified. The impacts addressed were accounted at both midpoint and endpoint level using the ReCiPe 2008 method.

Results and discussion LCA results showed that the use stage dominates the life cycle impacts. Nevertheless, the comparative study revealed that production emissions are a significant factor. Highest share in production emissions were identified for electronic components, namely printed wired boards and integrated circuits. Reconditioning and reuse of a secondary projector resulted in minor environmental impacts as compared to the replacement and use of an energy efficient successor. In case of a 10% increase in energy efficiency for a primary projector as compared to the secondary one, the replacement was compensated by energy efficiency gains after 10 years of usage. Thus, increasing common life span of 5 years up to 10 years is the preferable option over replacing for a 10% more efficient device.

Conclusions and Recommendations Life time extension provides remarkable environmental improvement potentials, while energy efficiency improvements as the currently prioritized strategy in environmental legislation are less significant. Life time extension does not only result in higher improvement potentials with regards to climate change as compared to energy efficiency increase, but also addresses resource availability and waste management as important features of electronic products. Therefore, the focus of mandatory product requirements for energy using products should be extended to measures of reusability in addition to energy efficiency increase in order serve the intent of an integrated product policy.

Keywords Allocation · Eletronic products · Energy efficiency increase · Life Cycle Assessment · Life time extension · Reuse · Refurbishment · Video projectors

Chui Wan Cheung

1 Introduction

Global environmental impacts, such as climate change, has put the current energy supply system of industrial society into question. Energy efficiency improvement is regarded as contributing substantially to the achievement of greenhouse gas emission targets in current environmental and energy policy (EC 2011). Consequently, environmental priority in ecodesign requirements for energy-related products is clearly set in energy efficiency increase since energy consumption is a dominating feature of the lifecycle impact (EU 2009).

However, the production of electronic products is also related to substantial environmental implications. Due to the very nature of its products, consumer electronics and information technology equipment have a complex material composition incorporating many different metals considered as critical from a resource availability perspective (Sander et al. 2012; Rotter et al. 2015). As a result of rapid innovation and release cycles as well as falling prices for end user equipment, the actual time of use decreases whereas the consumption of energy and resources increases as compared to other products (Fichter et al. 2009; OECD 2010; Prakash et al. 2012). Growing waste streams of electrical and electronic equipment (WEEE) are addressed by the european WEEE directive highlighting reuse prior to recycling and energy recovery (EU 2012). However, only recovery and recycling targets

have been implemented which allow to recapture raw materials and energy for new products, but do not keep the original design and function of existing products. Furthermore, current WEEE collection practice hinders reuse since possibly operable devices are damaged as a result of filling operations during transport. (Griese et al. 2004; Walther et al. 2010; Broehl-Kerner et al. 2012).

So far, Scheumann & Becker (2014) showed that life cycle impacts for notebooks can be substantially reduced by 73.5 kg CO_2-eq. in case of reusing a refurbished device another period of 2 years. Prakash et al. (2012) stated that productions emissions for notebooks with about 56% of total impacts are significantly higher than compared to the use stage and cannot be compensated in realistic time-periods by energy efficiency gains during usage. Within the scope of building on the EuP group analysis for sound and imaging equipment the use stage of projectors accounted for highest shares in life cycle impacts. Moreover, the established core technology of the projection engine was considered by industry experts as unlikely to increase in projected light output efficiency (AEA 2010; Ricardo-AEA 2013).

As the product system of video projectors has been rarely assessed, the study presents a comprehensive product life cycle analysis for an average projector. Moreover, the study summarizes main findings of life time extension in contrast to energy efficiency increase by comparing reconditioning for reuse of a secondary projector versus production and use of a primary device with lower energy consumption.

2 Methods

2.1 Scope

The main goal of the study was to compare environmental impacts of two options after regular first use of a video projector. First option was the refurbishment and reuse of a five-year-old projector. Second option was to replace and use a more energy efficient successor.

2.2 Functional unit

The product under study was an average video projector based on three secondhand LCD projectors. The devices analyzed present projectors typically used for education purposes in Europe (Fig. 1). The functional unit was defined as projected audiovisual content for the duration investigated.

2.3 Product system and system boundary

The product system under study covers the product life cycle from-cradle-to-grave including reconditioning for a second use phase, namely, production, use, refurbishment of defect devices, extraction of spare parts, reuse and disposal (Fig. 2). Given that life time extension results in avoiding emissions and resource consumption in primary production, credits were given using the substitution approach (see also section 2.4).

Fig. 1 Products under study. An average LCD projector was based on the device types NEC NP 400 *(left)*, Epson EB 93e *(middle)* and Sanyo PLC XD2200 *(right)*

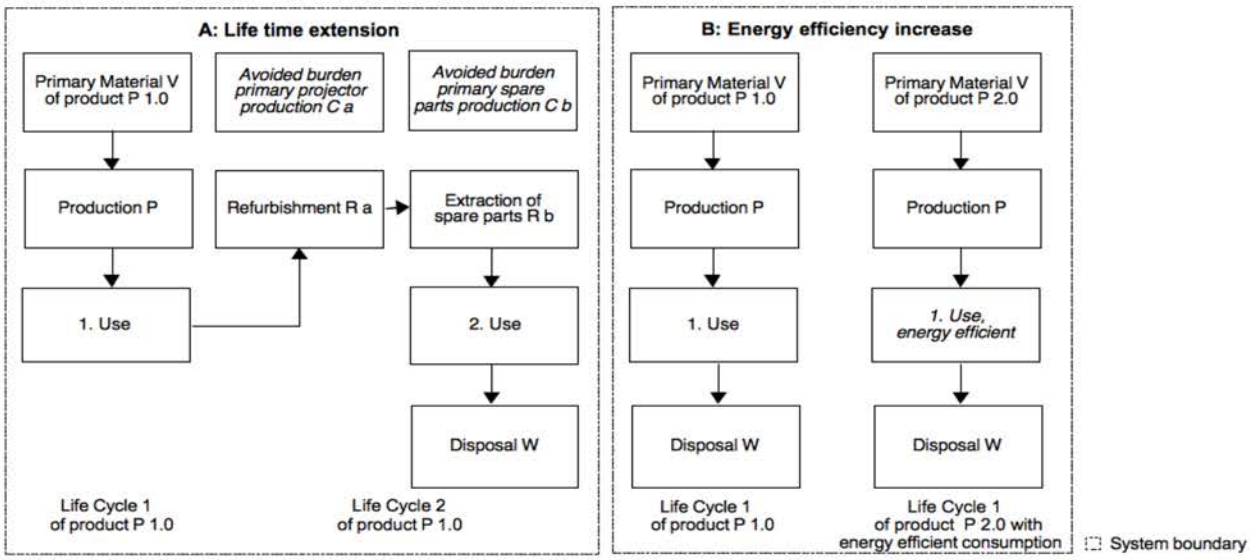

Fig. 2 Product system of an average projector (n=3) with progression in life cycles of product P 1.0 (A) and in energy efficiency of product P 2.0 (B)

Due to the complexity of the product, a detailed description of all data used cannot be made here. Instead, a summary of the main data sources and gaps is provided. The system was modeled with PE International LCA database by using the GaBi software 6.0. Reference area of the study was China for production, Europe for use and Germany for reconditioning and final disposal. Transport distances were modeled according to locations and assigned to preceding process modules.The projectors analyzed represent state of the art of LCD projection technology for the years of manufacture between 2008-2011. Including the generic projectors modeled as energy efficient primary successors, the reference time of the study was 2008-2014.

The following aspects were out of scope: Packaging materials, accessories or exterior components, such as remote control and power supply unit, were excluded. Differences in specifications or additional functions between primary and secondary projector were not addressed. The results of productions emissions are presented for all indicators using the ReCiPe 2008 method without complete evaluation of all indicators.

One of the most important data gaps encountered was the lack of foreground inventory data and background database on gas discharge lamps for projectors. Instead of high-pressure lamp commonly used in projectors, a low-pressure lamp available in the GaBi database with the mercury content of 30 mg based on published data (Sperlich 2014) and a security surcharge of 10% related to the weight of the glass bulb was modeled for all projectors analyzed.

Production: The environmental load during production was considered for the following main components:

- Casing
- Chassis components
- Control module
- Light source
- Optical engine
- Fans

Use: A usage pattern suitable for applications in business and education was modeled (Table 1). The average energy demand per year during usage for the secondary projectors are shown in Table 2. For the comparative analysis, primary projectors were generated with luminous efficiency increase of 5% and 10%, respectively (Table 3).

Reconditioning: The processes for reconditioning of primary projectors were based on primary data of a small enterprise, ReBeam GmbH in Berlin, Germany. The company is specialized in purchase and sale of used projectors within Europe. All incoming goods are inspected and cleaned for resale in case of proper functioning (ca. 60%) or reconditioned when inoperable (ca. 40%). The process of refurbishment involves the following operations: inspection, disassembly, cleaning, repair or replacement of defect components, assembly and quality assurance. Furthermore, the extraction of spare parts from broken devices provides the recovery of proper functioning components. In the following, both refurbishment and extraction of spare parts are referred to as reconditioning. According to the company, one defect projector results in 67% of a refurbished device and 20% can be extracted as spare parts.

Table 1 Operating pattern during use phase

Duration of usage	Inputs
First usage life time (years)	5
Second usage life time (years)	2
No. of days per year in use (days)	250
No. of hours per day used in normal mode[a] (hours)	2
No. of hours per day used in standby mode[b] (hours)	6

[a] powered condition of light source with default brightness in operating voltage

[b] unpowered condition of light source and fans with cable-connection to power source

Table 2 Energy consumption per year during the use phase

	Normal mode (kWh)	Standby mode (kWh)
NEC NP 400	147.5	16.5
Sanyo PLC XD2200	105	1.1
Epson EB 93e	149.5	0.6
Average	134	6.1

Table 3 Luminous efficiency for secondary (P 1.0) and primary projectors (P 2.0)

	P 1.0	P 2.0, 5 %	P 2.0, 10%
Light output (lm)	2400	2400	2400
Power normal mode (W)	268	252	240
Power standby mode (W)	4.0	0.5	0.5
Luminous efficiency (W/lm)	0.111	0.105	0.100

Disposal: The process of disposal corresponds to final waste disposal after second use. Though more life cycles might be possible, the base case was cut off after second use. Only material recycling of metals and energy recovery of plastics were considered.

2.4 Allocation

The processes of reconditioning was modeled with output oriented substitution, also known as avoided burden approach. While recycling secondary material by refurbishing substituted 67% of primary production, the extraction of spare parts replaced 20% of primary spare parts production according to avoided burdens of virgin material. The rest of 13% were considered as final disposal of the primary projector and environmental impact assigned to the recycling process of extracting spare parts.

2.5 Amortisation period of production emissions

As stated above, it was assumed that new generation of energy using products come along with energy efficiency increase. Thus, the global warming potential potential of a

primary projector $GWP_{Use,\ 2.0}$ as compared to a secondary projector $GWP_{Use,\ P\ 1.0}$ results in a reduction of emissions during consumption $GWP_{Saving\ potential\ per\ year}$ depending on the duration used:

$$GWP_{Saving\ potential\ per\ year} = GWP_{Use,\ P\ 2\ 0} - GWP_{Use,\ P\ 1\ 0} \quad (1)$$

The period of amortisation is the time duration $t_{Amortisation}$ in years necessary to compensate energy efficiency gains during usage for production emissions $GWP_{Production}$:

$$t_{Amortisation} = \frac{GWP_{Production}}{GWP_{Saving\ potential\ per\ year}} \quad (2)$$

The amortization period of product emissions allows for a clearer understanding of environmental impacts of production and use given in Eq. 2: The higher the saving potential and thus, the energy efficiency increase, the shorter the time-period of amortization required.

2.6 Impact indicators

The LCA study has been carried out using the combined ReCiPe 2008 method which is based on the CML 2002 and Ecoindicator 99 method and thus, allowed to address all impacts at both midpoint and endpoint levels (Goedkoop et al. 2013). Impact assessment for the contribution analysis of projector components has been applied at both midpoint and endpoint level with hierarchical perspective (time horizon of 100 years) in order to find environmental hotspots in production. With regards to the goal of the study, the impact assessment of life cycle stages had a focus on the impact categories global warming potential (GWP 100) and metal depletion (MDP) and besides, primary energy demand (PED).

3 Results

3.1 Life Cycle Inventory Analysis (LCI)

Table 4 and 5 show the bill of materials identified for main components and subcomponents, respectively. The data was gathered by manual disassembling and visual identification of the material.

Table 4 Average weight and share of main components. Numbers (No.) refer to subcomponents assigned at main components level in Table 5

No.	Main components	Average weight (g)	Average share in P 1.0 (%)
1-8	Plastics	1408	49.6
9-10	Metals	231	8.2
11-12	Optical components	263	9.3
13-19	Electronic components	936	33.0
	Total	2838	100

Table 5 Average weight and share of subcomponents

No.	Subcomponents	Average weight (g)	Average share in P 1.0 (%)
1	PC+ABS	563	19.9
2	PC	365	12.9
3	PPS	173	6.1
4	UP GF[1]	166	5.9
5	PPE	114	4.0
6	LCP GF	20	0.7
7	ABS	2	0.1
8	PP	2	0.1
9	Aluminium sheet AlMg 2.5	162	5.7
10	Steel sheet	69	2.4
11	Lenses	194	6.8
12	Gas discharge lamp	68	2.4
13	Populated PWBs[2]	495	17.4
14	Fans	255	9.0
15	Screws	48	1.7
16	Audio speaker	44	1.6
17	Cables	47	1.6
18	Plugs	35	1.2
19	LCD-panels	12	0.4

[1] Glass fiber
[2] Printed wired boards

3.2 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

3.2.1 Impact contribution analysis of projector components

Impact assessment results for the main components of an average video projector at midpoint level are displayed in Figure 3. The main impact contribution of components is caused by electronic components including printed wired boards (PWBs) which account between 70.0% and 98.4 % depending on the impact category. To meet the complexity of electric and electronic equipment, a detailed analysis of the subcomponents was conducted including scaled modeling of the PWBs. The impact results at subcomponent level in Table 6 reveal that active components, namely integrated circuits, have the highest share (39.3%-60.4%) in 8 out of 18 midpoint categories, followed by the unpopulated PWBs with highest contributions (25.5%-37.4%) in 4 midpoint categories.

Figure 4 shows the impacts results of production at endpoint level. According to the ReCiPe 2008 method, climate change appears to be the most relevant impact category for both human health (67.5%) and ecosystem diversity (96.9%), whereas fossil depletion accounts for 60.0 % of resource availability.

3.2.2 Impact contribution analysis of life cycle stages

Figure 5 shows the results for the contribution analysis of the life cycles stages under study. For the impact categories global warming potential and primary energy demand, the overall impacts are dominated by the use

Table 6 Environmental impacts at midpoint level for subcomponents of an average LCD projector during production (n=3)

	Production total	Populated wiring boards										Electronic components						Optical components		Metals		Plastics	Transport
		Un-populated PWBs	Integrated Circuits	Diodes	Transistors	Capacitors	Coils	Resistors	Ther-mistors	DIP switch	Oscillators	Fans	Plugs	LCD panels	Audio speaker	Screws	Cables	Gas discharge lamp	Lenses	Steel sheet, Inner Chassis	Aluminium sheet, Inner Chassis	Casing, Inner Chassis	China > EU
Climate change GWP [kg CO2-eq.]	8.07E+01	1.45E+01	4.53E+01	6 66E-01	1.76E-01	4 86E-01	2.16E+00	2.04E-02	6.51E-02	3 37E-03	5.10E-03	8 37E-01	2.81E-01	7.12E-01	7.45E-02	3 52E-01	3.12E-01	2.12E-01	2.19E-01	1 52E-01	1 55E+00	1.16E+01	9.77E-01
Human toxicity HTP [kg 1,4-DB-eq.]	1 63E+01	5 28E+00	2.87E+00	5.90E-02	1 53E-02	5 00E-02	4 03E-01	7.83E-03	1.34E-02	1.74E-03	6.79E-04	7.97E-02	1.60E+00	1 89E+00	4.42E-02	4 22E-02	8.90E-01	1 04E-01	1.76E-01	7 88E-02	7.11E-02	2 61E+00	3.11E-02
Ionising radiation IRP [kg U235-eq]	3.75E+00	2 66E-01	2.27E+00	4.71E-02	1 28E-02	2 68E-02	6 50E-02	1.07E-03	2.18E-03	1 21E-04	2.04E-04	1 87E-02	6.05E-02	2 05E-01	2 09E-02	7 57E-03	5 04E-02	9 21E-03	5.53E-03	1.10E-03	9 32E-02	5.90E-01	1.75E-04
Ozone depletion ODP [kg CFC-11-eq]	2.48E-06	3.71E-10	6.02E-09	1 32E-10	3 57E-11	1 20E-10	1 31E-10	1.04E-12	2.45E-12	3.73E-12	1.96E-13	2 22E-09	4.87E-08	5 25E-08	2 35E-09	1 38E-11	3 02E-08	2 62E-11	1.93E-11	1.46E-12	4 32E-10	2 33E-06	6 22E-14
Particulate matter formation PMFP [kg PM10-eq]	1 66E-01	4.19E-02	8.26E-02	1 02E-03	2 60E-04	7 66E-04	2.94E-03	7.43E-05	2.57E-04	1 06E-05	2.58E-05	1 34E-03	1.01E-03	1 32E-03	1 85E-04	7.10E-04	9 33E-04	6 05E-04	1.30E-03	2.18E-04	2 84E-03	1.78E-02	7 63E-03
Photochemical oxidant formation POFP [kg NMVOC]	3.11E-01	7.71E-02	1.55E-01	1.71E-03	4.40E-04	1.43E-03	5.76E-03	5.33E-05	2.13E-04	1 07E-05	1.02E-05	2 58E-03	1.44E-03	2 69E-03	2 55E-04	1 06E-03	1 35E-03	7 52E-04	3.93E-04	4.40E-04	4.19E-03	3 23E-02	2 22E-02
Terrestrial ecotoxicity TETP [kg 1,4-DB-eq.]	9.47E-03	2.42E-03	1.86E-03	3 00E-05	6 88E-06	1.96E-05	5 02E-04	2.41E-06	5.44E-06	7 65E-07	2.27E-07	2 82E-05	1.24E-03	1 05E-03	3 34E-05	6 54E-05	6 84E-04	3.95E-05	4.35E-04	6 05E-06	3.11E-05	1 01E-03	2 59E-06
Freshwater ecotoxicity FETP [kg 1,4-DB-eq]	2 63E-01	3 37E-02	4.08E-02	1 22E-04	3 22E-05	1 09E-04	1.97E-03	9.78E-06	2.81E-05	2.11E-06	2.47E-06	1.42E-03	2.82E-02	7.42E-02	9 35E-04	1.18E-04	1.43E-02	4.76E-05	3.53E-04	3.13E-05	2.19E-04	6 64E-02	2 04E-04
Marine ecotoxicity METP [kg 1,4-DB-eq]	2.43E-01	3 08E-02	4.90E-02	3.71E-04	7 81E-05	2.78E-04	8 68E-03	3.62E-05	7.30E-05	1 25E-05	2.02E-06	1 62E-03	2.85E-02	6 28E-02	9.92E-04	1.73E-03	1 59E-02	3 64E-04	1.06E-03	1 54E-04	4.19E-04	3.97E-02	2 84E-04
Terrestrial acidification TAP [kg SO2-eq.]	4 62E-01	9 23E-02	2.61E-01	3 08E-03	7 88E-04	1.76E-03	6.70E-03	2.00E-04	2.74E-04	4 28E-05	6.07E-06	4 26E-03	2.67E-03	4.12E-03	6.15E-04	2 07E-03	2 65E-03	9 54E-04	1.18E-03	4.78E-04	7 07E-03	4 55E-02	2.45E-02
Freshwater eutrophication FEP [kg P-eq]	3.72E-03	2 89E-04	2.34E-05	5 05E-07	1 38E-07	7 00E-07	9 69E-06	6.96E-08	2.13E-07	9.14E-09	2.09E-08	4.91E-05	7.98E-04	9 05E-04	2 84E-05	3 01E-07	4 07E-04	2.91E-07	1.20E-07	2 29E-07	8 05E-07	1 21E-03	1 05E-07
Marine eutrophication MEP [kg N-eq.]	1.74E-02	4 27E-03	6.83E-03	1 05E-04	2.79E-05	5 31E-05	2 84E-04	2.14E-06	7.05E-06	4.44E-07	3.88E-07	9.79E-05	1.14E-04	2.97E-03	1.70E-05	4 29E-05	9.42E-05	4.13E-05	6.59E-05	1.79E-05	1 57E-04	1 36E-03	8 29E-04
Natural land transformation NLTP [m²]	6.18E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.47E-05	8.71E-05	1.49E-04	5 50E-06	0	5 66E-05	1.19E-08	0	0	0	2.95E-04	0
Agricultural land occupation ALOP [m²a]	7 86E-01	2 66E-01	2.55E-01	5 27E-03	1 20E-03	2.78E-03	1 61E-02	1.69E-04	4.77E-04	2.99E-05	2.41E-05	1 24E-02	5.73E-02	2.95E-02	4 36E-03	1 68E-03	2 83E-02	1.45E-03	6.05E-04	6.13E-04	8.93E-03	9 26E-02	8 83E-04
Urban land occupation ULOP [m²a]	5.44E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3 21E-03	7.25E-03	1.17E-02	2.77E-04	0	3 51E-03	4.11E-08	0	0	0	2 85E-02	0
Fossil depletion FDP [kg oil-eq]	2 30E+01	3 82E+00	1.25E+01	1 82E-01	4 81E-02	1 60E-01	7 67E-01	6.39E-03	2.06E-02	1.13E-03	1.69E-03	4 82E-01	1.04E-01	1.74E-01	2 21E-02	9 37E-02	1.12E-01	6.46E-02	6.16E-02	4.12E-02	4 02E-01	3 64E+00	3 07E-01
Metal depletion MDP [kg Fe-eq]	3 54E+01	1 32E+01	1.09E+01	9 25E-02	8.95E-03	1.13E-01	7.14E+00	3.06E-02	4.17E-02	9.71E-03	4.53E-04	1 06E-01	4.64E-01	2 88E-01	1 36E-01	1.44E+00	8 51E-01	7 65E-02	5.44E-03	1 53E-01	2 26E-01	1.13E-01	4 63E-04
Water depletion WDP [m³]	9 29E+01	1 09E+01	4.10E+01	8 51E-01	2 27E-01	2.46E+00	1.43E+00	2.37E-02	5.12E-02	3.11E-03	4.23E-03	6 24E-01	2.01E+00	2.92E+00	2 55E-01	3 62E-01	1.98E+00	4.91E-01	9.38E-02	3 87E-02	1 85E+01	8.73E+00	1.77E-02

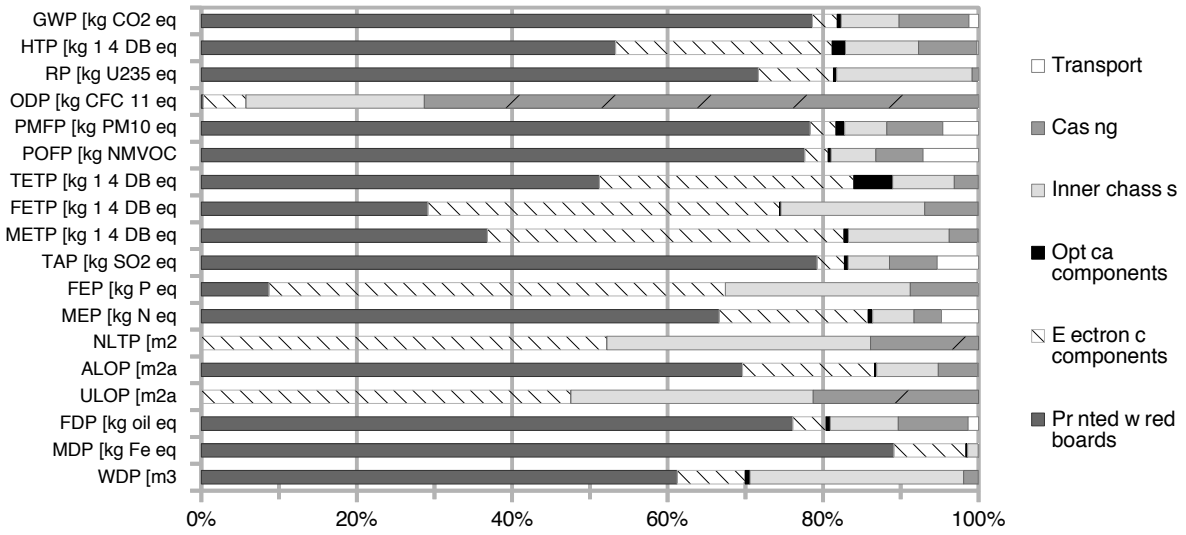

Fig. 3 Environmental impacts at midpoint level for main components of an average LCD projector during production (n=3)

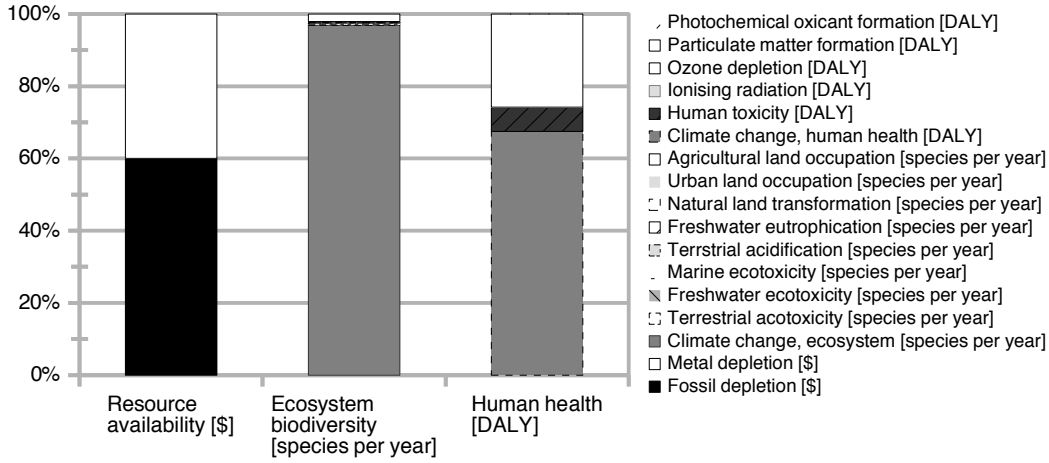

Fig. 4 Environmental impacts at endpoint level for main components of an average LCD projector during production (n=3)

phase, here divided into 5 years of first use and 2 years of second use, followed by the production emissions. Whereas for the metal depletion potential, the production emissions account for most of the total life cycle load.

3.2.3 Comparative analysis between secondary and primary projector

As stated, the use stage is the dominating factor of life cycle impacts for GWP and PED. However, the following results reveal that the production emissions for projectors are of considerable value in comparison of life time extension and energy efficiency increase. Figure 6 displays overall impact results for the reconditioning and reuse of an average secondary projector P 1.0 as compared to the production and use of a primary device P 2.0 with energy efficiency increase of 5% and 10% respectively. The reconditioning and reuse of a secondary projector as compared to a primary device with 5 % energy efficiency increase results in a potential reduction of 58.2 kg CO_2-eq., 781 MJ and 30.7 kg Fe-eq. In case of a 10% energy efficient increase of a primary device, the saving potential of a secondary projector is 52.6 kg CO_2-eq., 659 MJ and 30.7 kg Fe-eq., respectively.

Since the saving potential of a secondary projector due to avoided primary production emissions outweighs the reduced emissions due to energy efficiency gains of a primary product as well as the impacts of reconditioning, the overall impacts of life time extension are less than impacts for the replacement and use of energy efficient primary devices. The result indicate that reuse replacement of secondary projectors is the preferable option to reduce life cycle impacts, if major improvements in energy consumption do not occur.

3.3 Amortization period of product emissions

The results for the analysis of amortization periods are shown in Table 7. A primary projector P 2.0 with an energy efficiency increase of 5% and 10% as compared to an average secondary projector P 1.0 results in an annual saving potential during usage of 6.0 and 8.7 kg CO_2-eq.,

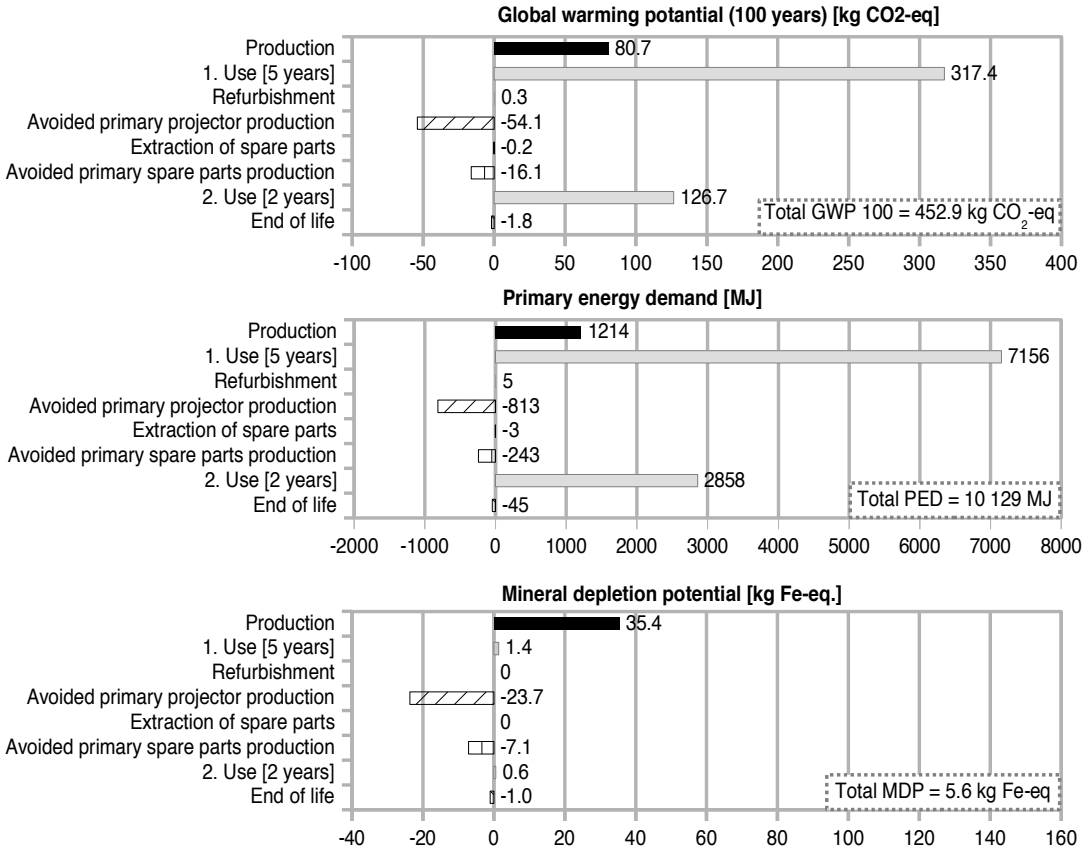

Fig. 5 Contribution analysis of life cycle stages for an average projector (n = 3). The total impact of the life cycle is presented with avoided impacts subtracted.

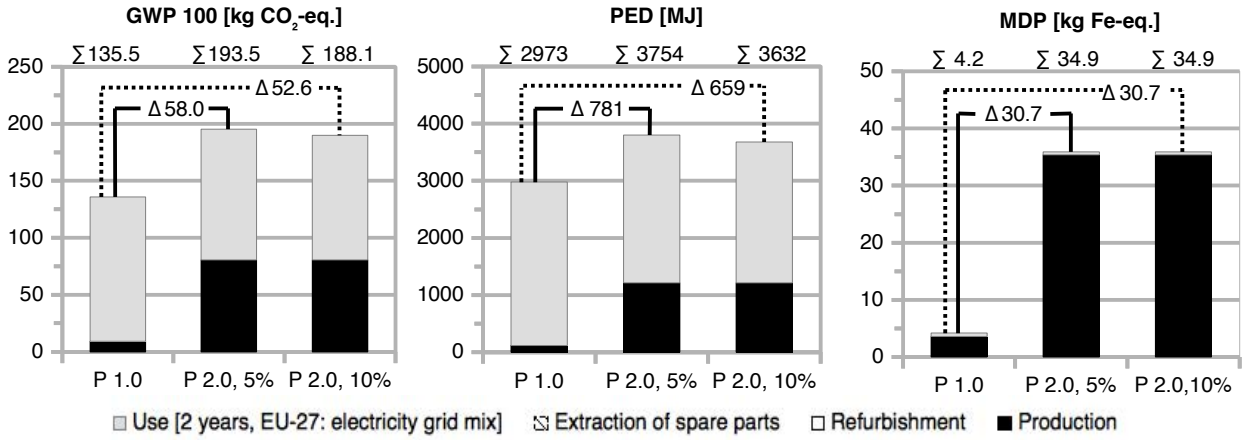

Fig. 6 Life cycle impacts of a secondary projector P 1.0 as compared to a primary device P 2.0 with energy efficiency increase of 5% and 10%. Total Impacts (∑) and potential reductions of a secondary projector as compared to a primary projector (Δ) correspond to units given in global warming potential (GWP 100), primary energy demand (PED) and metal depletion potential (MDP)

respectively. The amortization period of product emissions is about 14 and 10 years for a primary model with energy efficiency increase of 5% and 10%, respectively. This indicates that production emissions are compensated by energy efficiency gains of 5% and 10% during usage of a primary compensate after a usage period of 14 and 10 years, respectively. Thus, given a first use period of 5 years, reusing a secondary projector up to 9 and 5 years is to be preferred over replacing for a primary device with efficiency increase of 5% and 10%, respectively.

3.4 Energy source

The initial results verified that energy consumption during use was a critical driver of the overall global warming

potential and primary energy demand for projectors. The energy sources modeled in the base case represent the situation of electricity supply within Europe (EU-27) in 2011 based on over 85% on fossil fuels. A sensitivity analysis was conducted to determine the changes of impacts in case of an electricity supply based on renewable energy carriers. This scenario provides an outlook according to the european greenhouse gas reduction targets by 2050 since energy efficiency increase and renewable energy are considered as crucial in order to achieve the ambitious long-term goals (EC 2011).

Given an electricity supply based on wind power, the product system under study results in reduced GWP emissions during usage (Table 8) and increased amortization periods of product emissions (Table 9). The saving potential during usage of an energy efficient primary projector as compared to a secondary device decreases close to zero and, while the potential reduction of life cycle impacts for a secondary device increases up to 69.8 kg CO_2-eq. and 69.7 kg CO_2-eq. as compared to a primary projector with energy efficiency improvement of 5% and 10%, respectively. Thus, the amortization periods of product emissions for a 5% and 10% more efficient primary projector extent beyond 807 and 403.5 years, respectively. The results indicate that assumptions of the energy source modeled is an important factor that can reverse the overall impacts.

The base case already showed that life time extension provides higher saving potentials of greenhouse gas emissions than energy efficiency progression. In case of an energy supply entirely based on renewables, energy efficiency increase during consumption becomes dispensable and optimizing energy using products for reusability even more important from a long-term perspective. Moreover, as projectors and most electronic products used in Europe are produced in Asia, the inherent production emissions imported with the products cannot be compensated in realistic time-periods by energy efficiency gains during usage, but reduced if longer use patterns occur. From a transitions perspective, energy efficiency measures will likely still be necessary to bridge the period for which effective solutions are not yet feasible.

3.5 Allocation

The following section explores different open-loop allocation procedures of environmental burdens between products with regards to implications and perspectives of reusability in energy using products. The partitioning of GWP impacts for the studied processes based on allocation methods discussed by Ekvall and Tillmann (1997) were assigned according to formulas listed in Table 10. Furthermore, it was assumed that the substitution rates for reconditioning remained the same, so that material lost due to environmental degradation was accounted each time the product is reused.

Figure 7 shows the allocation approaches for both life time extension and energy efficient increase. The initial product system under study has been cut-off after the second life cycle. Here, the product system of life time extension entails four life cycles (LC 1-4), while an efficiency progression of 10% during consumption occurs for each follow-up device (P 2.0-4.0) in the product system of energy efficient increase. In total, energy efficiency progression accounts for 735.7 kg CO_2-eq.,

Table 7 Amortization period of production emissions

Electricity grid mix (EU-27)	P 1.0	P 2.0, 5 %	P 2.0, 10%
GWP Production [kg CO_2-eq.]	80.7	80.7	80.7
GWP Use per year, electricity grid mix [kg CO_2-eq.]	63.3	57.3	54.6
GWP Saving potential per year [kg CO_2-eq.]	-	6.0	8.7
Amortization period of GWP Production [years]	-	13.5	9.5

Table 8 Sensitivity analysis of energy source during use

	GWP-emission factor [kg CO_2-eq./kWh]	$GWP_{1, Use, P 1 0}$ [kg CO_2-eq.]	$GWP_{2. Use, P 1.0}$ [kg CO_2-eq.]	$GWP_{1. Use, P 2 0, 5\%}$ [kg CO_2-eq.]	$GWP_{1. Use, P 2.0, 10\%}$ [kg CO_2-eq.]
Electricity grid mix	0.452	316.7	126.7	114.6	109.2
Electricity from wind power	0.008	5.89	2.36	2.13	2.03
Percentage deviation between the two sources	-98.2 %	-98.1 %	-98.1 %	-98.1 %	-98.1 %

Table 9 Sensitivity analysis of energy source for the amortization period of production emissions

Electricity from wind power (EU-27)	P 1.0	P 2.0, 5 %	P 2.0, 10%
GWP Use per year, electricity from wind power [kg CO_2-eq.]	1.2	1.1	1.0
GWP Saving potential per year [kg CO_2-eq.]	-	0.1	0.2
Amortization period of GWP Production [years]	-	807	403.5
Percentage deviation between the two sources	-	+98.3%	+97.7%

Table 10 Formulas of open loop allocation procedures, variables as described in Fig. 7

Allocation method	Formula
Extraction load approach	$LC1 = (V + W) + Use$ $LC2 = R1_{(a+b)} + C1_{(a+b)} + Use$ $LC3 = R2_{(a+b)} + C2_{(a+b)} + Use$ $LC4 = R3_{(a+b)} + C3_{(a+b)} + Use$
Disposal load approach	$LC1 = Use$ $LC2 = R1_{(a+b)} + C1_{(a+b)} + Use$ $LC3 = R2_{(a+b)} + C2_{(a+b)} + Use$ $LC4 = (V + W) + R3_{(a+b)} + C3_{(a+b)} + Use$
50/50 load approach	$LC1 = \frac{V+W}{2} + \frac{R1_{(a+b)} + C1_{(a+b)}}{2} + Use$ $LC2 = \frac{R1_{(a+b)} + C1_{(a+b)}}{2} + \frac{R2_{(a+b)} + C2_{(a+b)}}{2} + Use$ $LC3 = \frac{R2_{(a+b)} + C2_{(a+b)}}{2} + \frac{R3_{(a+b)} + C3_{(a+b)}}{2} + Use$ $LC4 = \frac{V+W}{2} + \frac{R3_{(a+b)} + C3_{(a+b)}}{2} + Use$

whereas life time extension results in 693.7 kg CO_2-eq. Given that the product system of energy efficiency increase is linear and each product has only one life cycle, impacts of all life cycle stages have to be assigned for each product in case of replacement for a more energy efficient successor. Thus, the impacts of the linear product system for all allocation approaches considered are basically the same, while a progression of life cycles results in impacts shifted between life cycles depending on the allocation approach.

The *extraction load approach* is based on the perspective that final waste management is an inevitable consequence of material extraction. Thus, the combined impacts of virgin material production (V) and final waste treatment (W) are assigned to the first product. It promotes the reuse of material when the impacts of reconditioning are less than the impacts of production and disposal. Therefore, the extraction load approach is potentially the preferable method for secondhand retailers and their customers.

In contrast, the *disposal load approach* assumes that the amount of material lost in waste treatment must be replaced by virgin material production. From this perspective, production and disposal are assigned to the last product. It highlights the development and production of reusable materials given that impacts of reconditioning are less than the impacts of production and disposal. Thus, the disposal load approach is potentially rewarding for producers making efforts in longevity by design.

The *50/50 load approach* argues that supply and demand for reconditioned materials are both necessary to enable reuse. All impacts are shared in equal proportions, namely in first and last products for production and disposal as well as in previous and actual products for reconditioning. The 50/50 load method supports both reuse of materials and production of reusable materials if the impacts of reconditioning are less than the impacts of production and disposal.

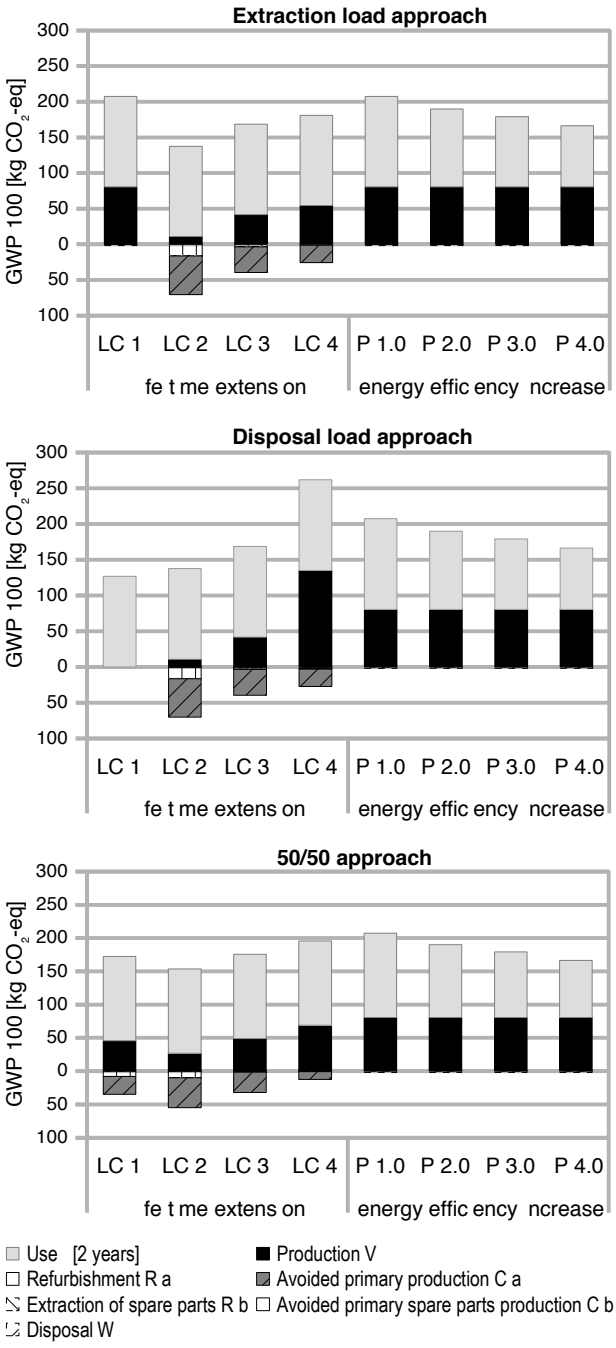

Fig. 7 Allocation approaches for life time extension (Life Cycles LC 1-4) and energy efficiency increase (10% increase for each Product P 2.0 - 4.0)

4 Conclusion

In summary, the LCA study suggests that life time extension of digital projectors is the preferable option to energy efficiency increase during use. In case of thenewer projector being 10% more efficient as compared to the older device, the replacement for a primary projector can only be justified after 10 years of usage which is the double life span of typical operating patterns to date. Life

time extension provides remarkable environmental improvement potentials, while energy efficiency improvement as the currently prioritized strategy in environmental legislation is less significant. Given that new releases of established technologies do not incorporate significant energy efficiency improvements and consuming patterns are shorter than technical life spans, the results of the case study for projectors indicate life time extension as a promising ecodesign strategy for consumer electronics and information technology products which is to be shown in future research.

Life time extension does not only result in higher improvement potentials with regards to climate change as compared to energy efficiency increase, but also addresses resource availability as well as waste management as important features of electronic products. Therefore, the study recommends a two-pronged strategy for ecodesign requirements of energy using products. The focus of mandatory product requirements should be extended to measures of reusability in addition to energy efficiency increase in order to serve the intent of an integrated product policy. Since reconditioning for reuse keeping the original design and function of products results in efficiency increase of material consumption, reusability targets should be introduced and prioritized over recycling and energy recovery targets for electronics.

Acknowledgements I would like to thank Jan Schulte, Jonas Huber, Janine Bush, Michael Vietzke and Hannes Ebertz at Rebeam GmbH for providing the projectors analyzed and detailed reconditioning information.

References

AEA (2010) Building on the Eco-design Directive, EuP Group Analysis (I) - ENTR Lot 3 Sound and Imaging Equipment Task 1–7 Report. AEA Group

Broehl-Kerner H, Elander M, Koch M, & Vendramin C (2012) Second Life - Wiederverwendung gebrauchter Elektro- und Elektronikgeräte. Umweltbundesamt

EC (2011) Energy Roadmap 2050. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Euopean Economic and Social Committe and the Committee of the Regions

Ekvall T, Tillmann A-M (1997) Open-loop recycling: criteria for allocation procedures. Int J Life Cycle Assess 2:155–162

EU (2009) Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products

EU (2012) Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)

Fichter K, Beucker S, Clausen J, Hintemann R (2009) Green IT Zukünftige Herausforderungen und Chancen. Umweltbundesamt

Goedkoop MJ, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, Van Zelm R (2013) ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation. http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet

Griese H, Poetter H, Schischke K, Ness O, Reichl H (2004) Reuse and lifetime extension strategies in the context of technology innovations, global markets, and environmental legislation. In: IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004, 173–178. IEEE. doi:10.1109/ISEE.2004.1299710

OECD (2010) Materials Case Study 1: Critical Metals and Mobile Devices. OECD Environment Directorate

Prakash S, Liu R, Schischke K, Stobbe L (2012) Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten. Umweltbundesamt

Rotter VS, Ueberschaar M, Geiping J, Chancerel P, Flamme S (2015) Recycling wirtschaftsstrategischer Metall aus Elektroaltgeräten - Ergebnisse aus dem Upgrade Projekt. In: Thomé-Kozmiensky KJ, Goldmann D (eds.) Recycling und Rohstoffe, Band 8. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin. pp 249–267

Schischke K, Griese H (2004) Is small green? Life Cycle Aspects of Technology Trends in Microelectronics and Microsystems. In: The 4th InLCA/LCM 2004 On-Line Conference, July 11-24, 2004

Sperlich K, Oehme I, Kraus K, Süring K, Gleis M, Butz W, Schnee E, Lehmann C, Friedrich B. Krüger F, Mordziol C (2014) Quecksilber in Umwelt und Produkten - Schwerpunkt Lampen. Umweltbundesamt

Malmodin J, Moberg Å, Lundén D, Finnveden G, Lövehagen N (2010) Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in the ICT and Entertainment & Media Sectors. J Ind Ecol 14(5):770–790. doi:10.1111/j.1530-9290.2010.00278.x

Sander K, Schilling S, Marschneider-Weidemann F, Wilts H, von Gries N, Hobohm J (2012) Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten - Meilensteinbericht August 2012. http://www.oekopol.de/de/themen/repro/publikationen.php

Scheumann R, Becker F (2014) Benefit of Re-use of IT Hardware for Society and Environment-a German Business Case. In: The 6th Living Knowledge Conference, April 9-11, 2014, Copenhagen, Denmark

Walther G, Steinborn J, Spengler TS, Luger T, Herrmann C (2010) Implementation of the WEEE-directive—economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany. http://doi.org/DOI 10.1007/s00170-009-2243-0