

Holger Rohn

(Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)

Nico Pastewski

(Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO)

Michael Lettenmeier

(Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH)

Unter Mitarbeit von:

Eberhard Büttgen (LFA, RWTH Aachen)

Martin Grismajer (IWF, TU Berlin)

Benjamin Kuhrke (PTW, TU Darmstadt)

Robert Kupfer (ILK, TU Dresden)

Bastian Lang (upp, Universität Kassel)

Katrin Bienge, Kora Kristof und Klaus Wiesen (Wuppertal Institut)

Chengizhan Aydin, Anna Cholewa, Almuth Eberhardt, Alain Heynen, Simon Kim, Mathias Leck, Peter Lucas, Melanie Lukas, Daniel Maga, Piotr Pacholak, Björn Reichardt, Silke Richter, Sebastian Rothenberg, Masi Sadeghi, Tobias Samus, Rüdiger Schmidt, Manuela Seitz, Lisa Marie Schimanski, Christoph Schniering, Verena Simon, Lene Stöwer, Jan Udes, Katrin Werner

Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse der Potenzialanalysen



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Holger Rohn

Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH

61169 Friedberg, Alte Bahnhofstr. 13

Tel.: +49 (0) 6031 68754 -64, Fax: -68

Mail: holger.rohn@trifolium.org

Nico Pastewski

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Germany

Tel.: +49 (0) 711 970 -5132, Fax: -2287

Mail: nico.pastewski@iao.fraunhofer.de

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492-183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

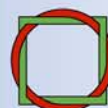
Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)

finden Sie unter www.ressourcen.wupperinst.org

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Wuppertal Institut in Kooperation mit

BASF

Borderstep

CSCP

Daimler

demea – VDI / VDE-IT

ECN

EFA NRW

FhG IAO

FhG UMSICHT

FU Berlin

GoYa!

GWS

Hochschule Pforzheim

IFEU

Institut für Verbraucherjournalismus

IÖW

IZT

MediaCompany

Ökopol

RWTH Aachen

SRH Hochschule Calw

Stiftung Warentest

ThyssenKrupp

Trifolium

TU Berlin

TU Darmstadt

TU Dresden

Universität Kassel

Universität Lüneburg

ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse der Potenzialanalysen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	11
1 Einleitung	13
2 Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Abwasserfiltration durch Membrantechnologie	14
3 Ressourceneffiziente Energiespeicherung: Vergleich von direkter und indirekter Speicherung für elektrifizierte PKWs	25
4 Ressourceneffizienzpotenziale bei der Energiespeicherung – ressourceneffiziente Wärmespeicher	31
5 Ressourceneffizienzpotenziale von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)	41
6 Ressourceneffizienzpotenziale der Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland	48
7 Ressourceneffiziente großtechnische Energieerzeugung: Potenziale von Desertec-Strom	59
8 Ressourceneffiziente Energieerzeugung: Bereich Photovoltaik	70
9 Ressourceneffizienzkriterien im Design am Beispiel Mobiltelefon	78
10 Green IT – Ressourceneffizienzpotenziale von Server Based Computing	89
11 Green IT – Ressourceneffizienzsteigerung bei IKT – Displaytechnologien im Vergleich	99
12 Ressourceneffizienzpotenziale beim Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten durch Rückgewinnung aus dem Hausmüll mit Hilfe einer RFID-Kennzeichnung der Primärprodukte	111

13	Ressourceneffizienzpotenziale in der Lebensmittelproduktion an den Beispielen Obst, Gemüse und Fisch	124
14	Ressourceneffizienzpotenziale der Intelligenten Landtechnik am Beispiel des Einsatzes von Stickstoffsensoren in der Düngung	139
15	Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der Verkehrssysteme am Beispiel des Güterverkehrs in Deutschland	151
16	Ressourceneffizienzpotenziale von Elektrofahrzeugen	164
17	Ressourceneffizienzkriterien im Produktentwicklungsprozess	174
18	Ressourceneffizienzpotenziale durch Umsetzung des Leichtbaus unter Nutzung neuartiger Werkstoffe	184
19	Ressourceneffizienzpotenziale höher- und höchstfester Stähle	194
20	Ressourceneffizienzpotenziale durch „Nutzen statt Besitzen“ bei Montageanlagen	205
21	Ressourceneffizienzpotenziale durch Production on demand	214
	Anhang	223

Abbildungen

Abb. 1:	Potenzialanalyse Anlagengröße 3 für Deutschland	18
Abb. 2:	Aufkommensvergleich der wichtigsten Materialien (log. Darstellung)	19
Abb. 3:	Ressourcenverbrauch bei der Herstellung der „Speicher“-Aggregate und durch die Nutzungsphase von 200.000 km im Energieszenario 1 „Strommix 2008“ ; Angabe nach MIPS-Kategorien in kg/km;	28
Abb. 4:	Ressourcenverbrauch der untersuchten Fahrzeug-Energiekonzepte nach MIPS-Kategorien	29
Abb. 5:	Ressourcenverbrauch des GFK-Speichers	34
Abb. 6:	Ressourcenverbrauch des Paraffin-Speichers	35
Abb. 7:	Material - Intensität der Wärmespeicher pro kWh _{th}	36
Abb. 8:	Ressourcenverbrauch der untersuchten Dämmstoffe pro m ² - Fassadenfläche nach MIPS-Kategorien	44

Abb. 9:	Ressourcenverbrauch und Anteile für Herstellung der Komponenten, Nutzungsphase sowie Errichtung und Abriss an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den analysierten Offshore-Windpark	51
Abb. 10:	Ressourcenverbrauch und dessen Aufteilung nach Herstellung der Komponenten, Nutzungsphase sowie Errichtung und Abriss an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den analysierten Onshore-Windpark	52
Abb. 11:	Ressourcenverbrauch und die Anteile nach Herstellung (Baustoffe, Maschinen, E-Technik), Substratbereitstellung (Substrate, Treibstoff, Dünger), Betriebsstoffe, Wartung und Reparatur sowie Aufwendung für Errichtung und Abriss für die untersuchte Biogasanlage	53
Abb. 12:	Vergleich des Ressourcenverbrauchs des eingespeisten Stroms der generierten Szenarien mit dem Strommix des Jahres 2008	54
Abb. 13:	Ressourcenverbrauch der untersuchten Anlagen im Vergleich zum Strommix 2008, jeweils ab Netz (ohne Berücksichtigung von Netzverlusten und Netzinfrastruktur)	57
Abb. 14:	Direktnormalstrahlung (DNI) im südlichen Europa und der MENA-Region	60
Abb. 15:	Strommix in der BRD in 2050	63
Abb. 16:	Anteile der wichtigsten Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerkes am Standort Marokko in 2025 am Gesamtverbrauch abiotischer Ressourcen	65
Abb. 17:	Ressourcenverbrauch der Strommixe	66
Abb. 18:	Hochrechnung auf den Ressourcenverbrauch der BRD	66
Abb. 19:	Herstellungsprozess des mc-Si- und des a-Si- Laminats	72
Abb. 20:	Vergleich des Ressourcenverbrauchs der untersuchten Varianten je Serviceeinheit	74
Abb. 21:	Ressourcenverbrauch des Standardhandys.	81
Abb. 22:	Ressourcenverbrauch der reduzierten Handy-Variante	82
Abb. 23:	Ressourcenverbrauch eines Smartphones ohne Abzug der Einsparungen durch andere Geräte	83
Abb. 24:	Ressourcenverbrauch eines Null-Energie-Handys	84
Abb. 25:	Vergleich der Ressourcenverbräuche der verschiedenen Handy-Konzepte in den verschiedenen Kategorien	85
Abb. 26:	Thin-Client (links) vs. PC (rechts)	90
Abb. 27:	Ressourcenverbrauch (abiotisches Material, Wasser, Luft) in der Nutzungsphase (Nutzung), in der Distributionsphase (Distribution),	

	durch den Einsatz von Materialien (Material) und für die Fertigung der Komponenten (Fertigung) für den Office PC _____	92
Abb. 28:	Ressourcenverbrauch (abiotisches Material, Wasser, Luft) in der Nutzungsphase (Nutzung), in der Distributionsphase (Distribution), durch den Einsatz von Materialien (Material) und für die Fertigung der Komponenten (Fertigung) für den Thin-Client inkl. Serveranteil _____	93
Abb. 29:	Entwicklung der durch PC und Thin-Client bedingten abiotischen Materialaufwands bei unterschiedlichen Marktanteilen bis 2050 _____	94
Abb. 30:	Abiotischer Materialaufwand beim PC durch Materialaufwand _____	95
Abb. 31:	Abiotischer Materialaufwand beim Thin-Client durch Materialaufwand _____	96
Abb. 32:	Das Verhältnis des Ressourceneinsatzes während der 5 a Nutzungsphase zwischen den drei Technologien LCD, Plasma und OLED in Abhängigkeit vom deutschen Strommix (2008), bei Vernachlässigung der Herstellungsphase _____	106
Abb. 33:	Stoffflüsse für die Fraktionen Hausmüll und Sammlung im Ist-Zustand (in t pro Jahr) _____	112
Abb. 34:	Stoffflüsse für die Fraktionen Hausmüll und Sammlung unter Berücksichtigung der RFID-Etiketten in der Fallstudie (in Tonnen pro Jahr) _____	113
Abb. 35:	Ressourcenverbrauch und Anteile der Stoffe an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den Ist-Zustand (in kg pro kg Recyclat) _____	117
Abb. 36:	Ressourcenverbrauch und Anteile der Stoffe an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für die Fallstudie (in kg pro kg Recyclat) _____	117
Abb. 37:	Vergleich des Ressourcenverbrauchs von Ist-Zustand und Fallstudie (in kg pro kg Recyclat) _____	118
Abb. 38:	Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Alaska Seelachs zu tiefgekühlten Filet _____	127
Abb. 39:	Ressourcenverbrauch für Fang und Direkt-Verarbeitung von Hering zu Filet _____	127
Abb. 40:	Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Thunfisch zu Filet in Dosen _____	128
Abb. 41:	Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Kabeljau zu tiefgekühltem Filet _____	128
Abb. 42:	Vergleich des Ressourcenverbrauchs für die untersuchten Fallbeispiele _____	129
Abb. 43:	Ressourcenverbrauch am Beispiel Orangen aus Spanien _____	130

Abb. 44:	Ressourcenverbrauch für Erdbeeren aus konventionellem Anbau in Spanien _____	130
Abb. 45:	Ressourcenverbrauch für Bananen aus konventionellem Anbau in Costa Rica _____	131
Abb. 46:	Ressourcenverbrauch für Äpfel aus integrierter Produktion in Deutschland _____	131
Abb. 47:	Ressourcenverbrauch für Tomaten (Unter Glas, Spanien) _____	132
Abb. 48:	Ressourcenverbrauch für Tomaten (Freiland, Italien) _____	132
Abb. 49:	Ressourcenverbrauch für Tomaten (Unter Glas, Niederlande) _____	133
Abb. 50:	Ressourcenverbrauch und Anteile am Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den Ist-Zustand (in t für die Düngung von 400 ha Gesamtanbaufläche) _____	143
Abb. 51:	Ressourcenverbrauch und Anteile am Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für die Fallstudie (in t für die Düngung von 400 ha Gesamtanbaufläche) _____	144
Abb. 52:	Ressourcenverbrauch für die Düngung eines Weizenfeldes mit 400 ha Gesamtanbaufläche bei variabler Düngung (Fallstudie) bezogen auf die konstante Düngung (Ist-Zustand) nach MIPS-Kategorien _____	145
Abb. 53:	Ressourcenverbrauch Lkw gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 60% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels _____	154
Abb. 54:	Ressourcenverbrauch Güterzüge gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 37% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels _____	155
Abb. 55:	Ressourcenverbrauch Binnenschiff gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 50% und Anteile der Wasserstraßen, Häfen und des Verkehrsmittels _____	156
Abb. 56:	Ressourcenverbrauch Frachtflugzeug gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 60% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels _____	157
Abb. 57:	Einsparpotenziale auf Basis des Jahres 2008 durch Einführung der Maßnahmen _____	159
Abb. 58:	Entwicklung der Verkehrsleistung in Deutschland für Personen- und Güterverkehr _____	164
Abb. 59:	Darstellung der bei Elektrifizierung des Antriebsstrangs modifizierten Baugruppen _____	166
Abb. 60:	Lebenswegweite Ressourcenverbräuche der verschiedenen Antriebssysteme _____	169

Abb. 61:	Strommix 2008 und die berechneten Ressourcenverbräuche _____	169
Abb. 62:	Lebenswegweite Ressourcenverbräuche unter Berücksichtigung verschiedener Strommixe _____	170
Abb. 63:	Lebenswegweite Ressourcenverbräuche unter Berücksichtigung verschiedener Strommixe und einer verkürzten Batterielebensdauer ____	171
Abb. 64:	Vorhersagequalität von Umweltauswirkungen während des Konstruktionsprozess _____	175
Abb. 65:	Integrierte Darstellung von Produktentwicklung und Produktlebensweg _	176
Abb. 66:	Angestrebte Vorgehensweise der ressourceneffizienten Produktentwicklung _____	177
Abb. 67:	Sitzschale, Anwendungsbereich _____	185
Abb. 68:	Gegenüberstellung der Sitzschalenvarianten _____	185
Abb. 69:	Stoffstromanalyse der konventionellen Stahlsitzschale _____	187
Abb. 70:	Stoffstromanalyse der Leichtbausitzschale _____	188
Abb. 71:	Materialinput pro Sitzschale _____	188
Abb. 72:	Verteilung des Materialeinsatzes pro Sitzschale _____	189
Abb. 73:	Materialinput pro Leichtbaukilogramm _____	190
Abb. 74:	Einfluss der Gewichtseinsparung durch Leichtbau _____	190
Abb. 75:	Mögliche Anwendungen für textilverstärkte Thermoplastbauteile im Kraftfahrzeug _____	191
Abb. 76:	Energieverbrauch verschiedener Gießwalzanlagen zur Warmbanderzeugung _____	196
Abb. 77:	Ressourcenverbrauch von Herstellungsverfahren zur Warmbanderzeugung bezogen auf die Jahresproduktion in Deutschland 2003 _____	197
Abb. 78:	Verbrauch abiotischer Ressourcen beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung _____	199
Abb. 79:	Wasserverbrauch beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung _____	200
Abb. 80:	Luftverbrauch beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung _____	201
Abb. 81:	Ressourcenverbrauch und Anteile für die Herstellung der Komponenten sowie die elektrische Energie für den Betrieb an dem	

	Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für das traditionelle Geschäftsmodell _____	208
Abb. 82:	Ressourcenverbrauch und Anteile für die Herstellung der Komponenten sowie die elektrische Energie für den Betrieb an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für das Product-Service System _____	209
Abb. 83:	Vergleich des Ressourcenverbrauchs des Szenarios „Product-Service System“ bezogen auf das Szenario „Traditionelles Geschäftsmodell“ in den drei Ressourcenkategorien _____	210
Abb. 84:	Wettbewerbsvorteile mittels Production on demand. _____	214
Abb. 85:	Auftragstypen mit verschiedenem Anteil auftragsgetriebener Elemente _	215
Abb. 86:	Ressourcenverbrauch bei 1 Mio. Zeitschriften mit und ohne Remissionen _____	220

Tabellen

Tab. 1:	MIPS der konventionellen Anlage _____	16
Tab. 2:	MIPS der Membrananlage _____	16
Tab. 3:	Vergleich der Materialintensitäten _____	17
Tab. 4:	Ermitteltes Skalierungspotenzial Deutschland _____	17
Tab. 5:	Eckdaten der untersuchten Technologien / Fahrzeugtypen _____	26
Tab. 6:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten „Speicherkonzepte“ ____	30
Tab. 7:	Materialintensität der Herstellung des Referenz- und Faktor X Kollektors _____	36
Tab. 8:	Anzahl der Haushalte in Deutschland (2008) _____	37
Tab. 9:	Einsparungen ggü. dem konventionellen Warmwasser - Wärmespeicher bei den Einfamilienhaushalten (bei einer Auslegung für 66 kWh _{th}) _____	37
Tab. 10:	Einsparungen ggü. dem konventionellen Warmwasser - Wärmespeicher bei den Zweifamilienhaushalten (bei einer Auslegung für 132 kWh _{th}) _____	38
Tab. 11:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten alternativen Wärmespeicher nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	39
Tab. 12:	Eckdaten der Dämmstoffe _____	42
Tab. 13:	RessourceneffizienzPotenziale für 1,6455 Mrd.m ² Fassadenfläche _____	45

Tab. 14:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Dämmstoffprodukte nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	46
Tab. 15:	Eckdaten der untersuchten Anlagen _____	49
Tab. 16:	Ressourcenverbrauch und Einsparung der untersuchten Szenarien _____	54
Tab. 17:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	56
Tab. 18:	Übersicht über betrachtete CSP _____	61
Tab. 19:	Szenario des Desertec-Ausbaus _____	62
Tab. 20:	Ressourcenverbrauch der CSP am Standort Marokko im Bezugsjahr 2025, Technologie-bedingte Veränderungen _____	64
Tab. 21:	Ressourcenverbrauch eines Parabolrinnenkraftwerkes im Bezugsjahr 2025, Standort-bedingte Veränderungen _____	64
Tab. 22:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach Rohn et al. (2009) _____	68
Tab. 23:	Eckdaten der untersuchten PV-Lamine _____	71
Tab. 24:	Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial _____	74
Tab. 25:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	76
Tab. 26:	Eckdaten der untersuchten Konzepte jeweils bezogen auf das Standard-Handy _____	79
Tab. 27:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Konzepte nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien im Vergleich zum heutigen Standard-Handy _____	86
Tab. 28:	Verkaufszahlen von PCs und Thin-Clients in der Bundesrepublik Deutschland _____	93
Tab. 29:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	97
Tab. 30:	Übersicht über die Displayarten _____	101
Tab. 31:	Typisches Produktgewicht verschiedener Displayarten in der UK _____	102
Tab. 32:	Monitorgewichte _____	102
Tab. 33:	Berechnungen der Materialzusammensetzung eines 60 Zoll Bildschirms _____	102
Tab. 34:	Materialübersicht Dünne Schichten - LCD-Display _____	103
Tab. 35:	Übersicht Leistungsaufnahme _____	103

Tab. 36:	Übersicht MIPS der Displaytechnologien LCD und PDP, mit einem Vergleich zwischen den Herstellungsmaterialien und der Nutzungsphase _____	105
Tab. 37:	Übersicht MIPS der Displaytechnologie OLED _____	105
Tab. 38:	Ressourcenverbrauch und Ressourceneffizienzpotenzial in Deutschland, wenn sämtliche CRT Monitore ersetzt werden, ohne Nutzungsphase _____	107
Tab. 39:	Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien _____	119
Tab. 40:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	120
Tab. 41:	Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien _____	145
Tab. 42:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	147
Tab. 43:	Daten der untersuchten Verkehrsmittel _____	152
Tab. 44:	Daten zur Verkehrsinfrastruktur _____	152
Tab. 45:	Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs im Güterverkehr _____	157
Tab. 46:	Quantifizierung der Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs im Güterverkehr und Vergleich des Ressourcenverbrauchs vor und nach Einführung der Maßnahmen _____	158
Tab. 47:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Maßnahmen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	161
Tab. 48:	Berücksichtigte Komponenten in der Stoffstromanalyse des Elektroantriebs _____	167
Tab. 49:	Berücksichtigte Komponenten in der Stoffstromanalyse des dieselmotorischen Antriebs _____	167
Tab. 50:	Qualitativer Vergleich der Antriebsvarianten _____	171
Tab. 51:	Konzeptauswahlstabelle der Stabilisatorflosse, inklusive Ressourcenverbrauchsbetrachtung _____	179
Tab. 52:	Qualitative Bewertung des Ressourceneffizienten Designs anhand der 7 Bewertungskriterien nach Rohn et al. (2009) _____	181
Tab. 53:	Ressourcenverbrauch und Einsparung der untersuchten Szenarien _____	191
Tab. 54:	Qualitative Bewertung der Leichtbausitzschale _____	192
Tab. 55:	Untersuchte Werkstoffe und Verfahren zur Warmbänderzeugung _____	195

Tab. 56:	Zusammensetzung, Legierungselemente und resultierender Ressourcenverbrauch in t/t für das Vergleichsfahrzeug mit konventionellem Stahl und der Zusammensetzung aus verschiedenen HHS _____	198
Tab. 57:	Zusammenfassende Bewertung nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	203
Tab. 58:	Vergleich der untersuchten Szenarien „Traditionelles Geschäftsmodell“ und „Product-Service System“ mit schematischer Darstellung _____	206
Tab. 59:	Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien _____	210
Tab. 60:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	211
Tab. 61:	Verschwendungsarten in der Produktion _____	216
Tab. 62:	Auszug der durchgeführten Untersuchungen zur Überproduktion _____	217
Tab. 63:	Ergebnisse der Expertenbefragung _____	218
Tab. 64:	Zusammenfassende Bewertung des Fallbeispiels „Zeitschriftenindustrie“ nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien _____	221

1 Vorwort und Danksagung

Die Inhalte des vorliegenden Papiers sind in einer intensiven Zusammenarbeit einer Vielzahl von unterschiedlichen Personen entstanden:

Wir zeichnen als Arbeitspaketleitung verantwortlich für die konzeptionelle Arbeit sowie alle Texte zu den übergreifenden Ergebnissen und Schlussfolgerungen. Wir haben zusammen mit den anderen Partnern von AP1 ein expertengestütztes Diplomandenprogramm umgesetzt. Ergebnisse der Arbeiten der Studierenden zu den Potenzialanalysen sind in die Ergebnisse von AP1 eingeflossen. Bei der Betreuung der studentischen Arbeiten wurde AP1 bei einigen Themen durch weitere Hochschulen unterstützt. Die Tabelle im Anhang gibt einen Überblick über alle Arbeiten und die jeweils beteiligten Studierenden und Betreuenden mit Angabe der beteiligten Hochschulen.

Unser Dank geht an alle Projektpartner, die weiteren Betreuenden und alle Studierende, die die Vielzahl der unterschiedlichen Themen mit großem Engagement bearbeitet und begleitet haben. An dieser Stelle seien insbesondere auch die vielen inhaltlichen Diskussionen und Gespräche im Rahmen der verschiedenen Analyse-, Bewertungs-, Auswertungs- und Diplomanden-Workshops genannt.

Beim ifu – Institut für Umweltinformatik in Hamburg und bei Prof. Mario Schmidt (Fachhochschule Pforzheim) bedanken wir uns ganz herzlich für die Kooperation mit der Umberto Stoffstromanalyse-Software. Entsprechende Lizenzen wurden den Studierenden für die Bearbeitung der Potenzialanalysen kostenfrei zur Verfügung gestellt und die Betreuenden in einer Qualifizierung eingewiesen.

Nicht zuletzt bedanken wir uns auch bei allen Personen und Institutionen, die an der breit angelegten Umfrage im Frühjahr/Sommer 2008 teilgenommen bzw. uns dabei unterstützt haben. Hierdurch konnten viele neue Ideen und Aspekte in der frühen Bearbeitungsphase der Analyse des Feldes und im Auswahlprozess für die „Top20“ Themen berücksichtigt werden. Unser Dank gilt ganz besonders auch den Teilnehmenden an den beiden Experten-Workshops, die die Themenauswahl und erarbeiteten Inhalte im Vorfeld der Workshops umfangreich kommentiert und in den Workshops intensiv mit uns diskutiert haben. Sie gaben wichtige Anregungen und Impulse, die in die Projektergebnisse insgesamt und dieses Papier eingeflossen sind.

Zudem bedanken wir uns für die gemeinsame Bearbeitung und Co-Leitung des AP1 bei Dr. Claus Lang-Koetz (FhG IAO) bis zum Oktober 2009 und Dr. Daniel Heubach (FhG IAO) bis zum Juli 2010.

Nicht zuletzt möchten wir uns ganz herzlich für die wertvollen und hilfreichen Kommentare und Anregungen von Dr. Kora Kristof (Gesamtprojektleitung, Wuppertal Institut) sowie von Felix Müller und Kristine Koch (Fachbegleitung Umweltbundesamt) möchten wir uns ganz herzlich bedanken.

Holger Rohn und Nico Pastewski

2 Einleitung

Umweltbelastungen durch die Entnahme und Nutzung von Ressourcen, die damit verbundenen Emissionen und auch die Entsorgung von Abfällen führen zu ökologischen und direkt oder in der Folge auch zu sozialen und ökonomischen Problemen. Versorgungsunsicherheit, Ressourcenknappheit, die sich daran entzündenden internationalen Rohstoffkonflikte, sowie hohe und stark fluktuierende Rohstoffpreise können zu starken ökonomischen und sozialen Verwerfungen in allen Ländern der Erde führen. Die Wettbewerbsnachteile, die durch eine ineffiziente Ressourcennutzung entstehen, gefährden die Entwicklung von Unternehmen und Arbeitsplätzen. Die Steigerung der Ressourceneffizienz wird daher in der nationalen und internationalen Politik zunehmend zum Top-Thema. Vor diesem Hintergrund beauftragten das Bundesumweltministerium und das Umweltbundesamt 31 Projektpartner unter Leitung des Wuppertal Instituts mit dem Forschungsprojekt „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes, vgl. <http://ressourcen.wupperinst.org>). Ziel des Projektes sind substantielle Wissensfortschritte zu vier Kernfragen für die Steigerung der Ressourceneffizienz und für die Ressourcenschonung.

- Erstens gilt es, die Potenziale der Ressourceneffizienzsteigerung zu ermitteln.
- Zweitens sind Ansätze für zielgruppenspezifische Ressourceneffizienzpolitiken zu entwickeln.
- Drittens werden Ergebnisse hinsichtlich der Wirkungsanalyse auf gesamt- und betriebswirtschaftlicher Ebene erwartet.
- Der vierte Baustein ist die wissenschaftliche Begleitung der konkreten Umsetzung und des Agenda Setting sowie die Verbreitung der Ergebnisse.

Schwerpunkt und Zielrichtung des vorliegenden Papiers

Das vorliegende Papier des Arbeitspaketes 1 (AP1) beinhaltet die jeweils etwa 10-seitigen Ergebniszusammenfassungen der ausgewählten „Top-20 Themen“ für die Potenzialanalysen zu Technologien, Produkten und Strategien. Es baut damit auf dem Ressourceneffizienz Paper 1.2 (Rohn et al. 2009) mit dem Schwerpunkt auf die Ausgangsbasis und den Auswahlprozess für die Themen der Potenzialanalysen auf und ergänzt das Ressourceneffizienz Paper 1.4 (Rohn et al. 2010), welches jeweils einseitige Zusammenfassungen der Potenzialanalysen der „Top20“ Themen mit einer Querauswertung und übergreifenden Handlungsempfehlungen beinhaltet. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des in ein Expertennetzwerk eingebundenen Diplomandenprogramms erarbeitet.

3 Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Abwasserfiltration durch Membrantechnologie

Matthias Leck (Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

Bastian Lang (Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

Dr. Mark Junge (Limón GmbH)

3.1 Einleitung

Angesichts des wachsenden Bedarfs an sauberem Wasser, nicht nur als Trinkwasser, sondern auch zur Erzeugung von Nahrungsmitteln infolge der steigenden Weltbevölkerung, ist eine nachhaltige und effiziente Reinigung erforderlich. Der Einsatz von Membrananlagen beschränkt sich hierbei nicht einzig und allein auf die industrielle und kommunale Abwasserreinigung, sowie Trinkwasseraufbereitung. Hierbei sind dezentrale und mobile Gesamtlösungen, die lokal gezielt eingesetzt und dabei mobil genutzt werden können, von zunehmender Bedeutung. Gerade für Krisengebiete ist das ein enormer Gewinn, da mit Hilfe dieser Technologie schnell und effizient geholfen werden kann (s. Leck 2010 / Universität Oldenburg 2010).

3.2 Vorgehensweise

In der Arbeit nach (Leck 2010) erfolgt ein Vergleich zwischen einer konventionellen kommunalen Kläranlage (K-KA) mit 5.800 angeschlossenen Einwohnern und einer mit einem Membranbioreaktor (MBR-KA) ausgestatteten Kläranlage der gleichen Größenordnung.

3.2.1 Untersuchte Anlagen

Als System zur Berechnung der Materialintensitäten dient eine mechanisch-biologische Kläranlage für 5.800 EW (s. Pfaffinger 2010). Die erhobenen Daten umfassen u.a. ein Maschinenhaus, in der Rechen-, Sand-, und Fettfang sowie die Sandwäsche als auch das Rücklaufschlammumpwerk, die Gebläsestation, der Geräte- und Schaltschrankraum untergebracht sind. Weiterhin ist ein Belebungsbecken mit den Abmaßen 30 x 13,40 m und einer Tiefe von 7,30 m, sowie ein Nachklärbecken von 18 m Durchmesser und einer Tiefe von 5,50 m enthalten. Der im System verbleibende Restklärschlamm wird in drei dafür vorgesehenen Schlammstapelbehältern untergebracht. Neben den Gebäudestrukturen wurden auch die Verbau- und Gründungsarbeiten, interne Verbindungs- und Versorgungsleitungen, diverse Kleinbauwerke, allgemeine Erdarbeiten und Außenanlagen berücksichtigt. Auf Grundlage der gewonnenen Daten über die Kon-

struktion der konventionellen Kläranlage ist es möglich einen Membranbioreaktor zu integrieren. Hierbei entfällt das Nachklärbecken vollständig (s. Leck 2010).

3.2.2 Definition der Serviceeinheit

Um eine sinnvolle Betrachtung und eine Möglichkeit des Vergleichs von Verfahren im Bereich der Wasserbehandlung mittels Membrantechnologie zu erreichen, werden die kumulierten MI-Werte der Abwasserreinigung für das Membranverfahren, als auch die des Referenzsystems, auf einen m^3 Abwasser bezogen.

3.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Es wurden die Massen und Basismaterialien sowie die Energieaufwendungen über den gesamten Lebenszyklus erfasst.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen (s. Leck 2010):

- Die Lebensdauer der Anlagen ist auf 30 Jahre festgelegt. Die für den Betrieb nötigen Aufwendungen wie der Stromverbrauch werden im Betriebsbereich berücksichtigt. Für die Wartung und Instandsetzung gibt es einen entsprechenden Wartungsbereich. Bei beiden sind die jeweiligen Aufwendungen für alle Teilkomponenten kumuliert aufgeführt.
- Der Ressourcenverbrauch für die Herstellung von Halbzeugen und Komponenten wurde über pauschale Fertigungszuschläge ermittelt.
- Der Einbezug des Materialverschnitts bei der Produktion erfolgte über pauschale Materialausnutzungsgrade.
- Für jegliche Eisenmetalle wurde angenommen, dass sie aus Primärrohstoffen im Hochofen hergestellt werden.
- Für Maschinen- bzw. Anlagenteile wird der Transportaufwand von Rohstoffen und Halbzeugen zu den jeweiligen Fertigungshallen nicht berücksichtigt.
- Die Abrissphase ist der Bauphase gleichgestellt. Alle zum Bau benötigten Komponenten werden dementsprechend am Ende demontiert.

3.2.4 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der MIPS-Bilanzierung für die konventionelle- als auch die der Membrananlage abgebildet.

3.2.5 MIPS der konventionellen Anlage

Als maßgebender Betriebsfaktor ist der Stromverbrauch der gesamten Anlage von 44 kWh/EW und Jahr berücksichtigt. Die über den Betriebszyklus von 30 Jahren anfallenden Reparaturen für Komponenten wurden gesondert berücksichtigt. Für die gesamte konventionelle Kläranlage ergeben sich ein abiotischer Ressourcenverbrauch von $14,50 \text{ kg} / \text{m}^3_{\text{Abwasser}}$, sowie ein Verbrauch an Wasser von $99,08 \text{ kg} / \text{m}^3_{\text{Abwasser}}$. Der Luftverbrauch beträgt $1,32 \text{ kg} / \text{m}^3_{\text{Abwasser}}$ (s. Tab. 1).

Tab. 1: MIPS der konventionellen Anlage

abiotische Stoffe	Wasser	Luft
14,50 kg/m ³ _{Abwasser}	99,08 kg/m ³ _{Abwasser}	1,32 kg/m ³ _{Abwasser}

Quelle: Leck 2010

3.2.6 MIPS der Membrankläranlage

Als maßgebender Betriebsfaktor ist der erhöhte Stromverbrauch der gesamten Anlage von 61,6 kWh/EW und Jahr, infolge der Integration des Membranbioreaktors, berücksichtigt (s. Leck 2010). Die entsprechenden erweiterten Reparaturaufwendungen sind ebenfalls berücksichtigt. Für die gesamte Membrankläranlage ergeben sich ein abiotischer Ressourcenverbrauch von 13,05 kg / m³_{Abwasser}, sowie ein Wasserverbrauch von 98,13 kg / m³_{Abwasser}. Der Luftverbrauch beträgt 1,32 kg / m³_{Abwasser} (s. Tab. 2).

Tab. 2: MIPS der Membrananlage

abiotische Stoffe	Wasser	Luft
13,05 kg/m ³ _{Abwasser}	98,13 kg/m ³ _{Abwasser}	1,32 kg/m ³ _{Abwasser}

Quelle: Leck 2010

3.3 Folgerungen

Nachfolgend werden die in Kapitel 3.2.4 zusammengefassten Ergebnisse in einen zusammenfassenden Kontext überführt, verglichen, diskutiert, sowie wirtschaftspolitisch untersucht. Weiterhin wird eine Potenzialanalyse auf Basis einer deutschlandweiten Skalierung durchgeführt.

3.3.1 Vergleich des Ressourcenverbrauchs

Auch beim Betrachten der Materialintensitäten und der in der Tabelle dargestellten absoluten und relativen Einsparung wird deutlich, dass die Membrantechnologie durchweg gute Ergebnisse liefert. Die Masseneinsparung der MBR-Anlage beträgt absolut 9.648 t (14 %). Bei den abiotischen Stoffen wird eine Einsparung von 13.801 t (10 %) erreicht. Der Wasserbedarf ist um 8.978 t (1 %) geringer. Der Luftverbrauch ist mit 22 t (0,2 %) nur unwesentlich geringer als beim Referenzsystem mit konventioneller Klärung (s. Leck 2010) (s. Tab. 3).

Tab. 3: Vergleich der Materialintensitäten

Lösung	abiot. Materialien (t)	Wasser (t)	Luft (t)
Konvent.	138.110	943.849	12.556
MBR	124.309	934.871	12.534
Einsparung (abs./rel.):	-13.801 -10 %	-8.978 -1 %	-22 -0,2 %

Quelle: Leck 2010

3.3.2 Potenzialanalyse auf Bundesebene

Auf Grundlage der in der Bilanzierung betrachteten Anlagengröße ist keine Skalierung auf alle 10.000 kommunalen Kläranlagen möglich. Eine Skalierung auf alle Kläranlagen der Größenklasse 3 und die daraus resultierende Ressourceneffizienzsteigerung kann jedoch durchgeführt werden (s. Umweltbundesamt 2009) (s. Abb. 1).

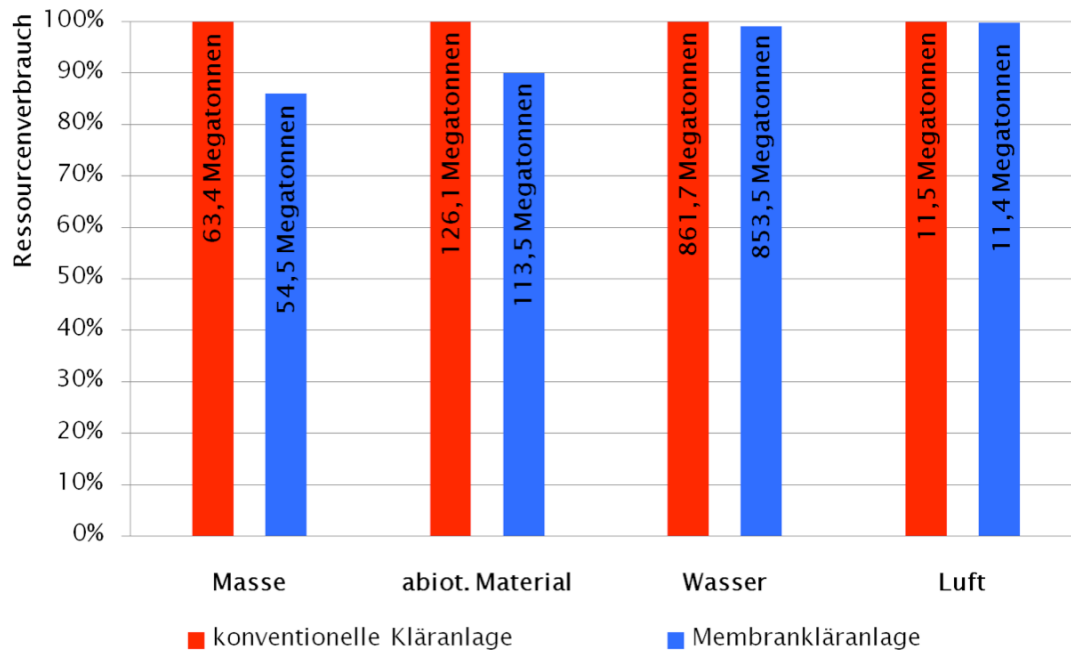
Tab. 4: Ermitteltes Skalierungspotenzial Deutschland

Lösung	abiot. Stoffe (t)	Wasser (t)	Luft (t)
Einsparungsreferenz	13.801	8.978	22
Einsparung Deutschland	12.600.313	8.196.914	20.086

Quelle: Leck 2010

Bei den 913 Kläranlagen der betrachteten Größenklasse 3 lassen sich 12,6 Megatonnen abiotische Stoffe, 8,2 Megatonnen Wasser 22 Kilotonnen Luft einsparen (s. Tab. 4).

Abb. 1: Potenzialanalyse Anlagengröße 3 für Deutschland

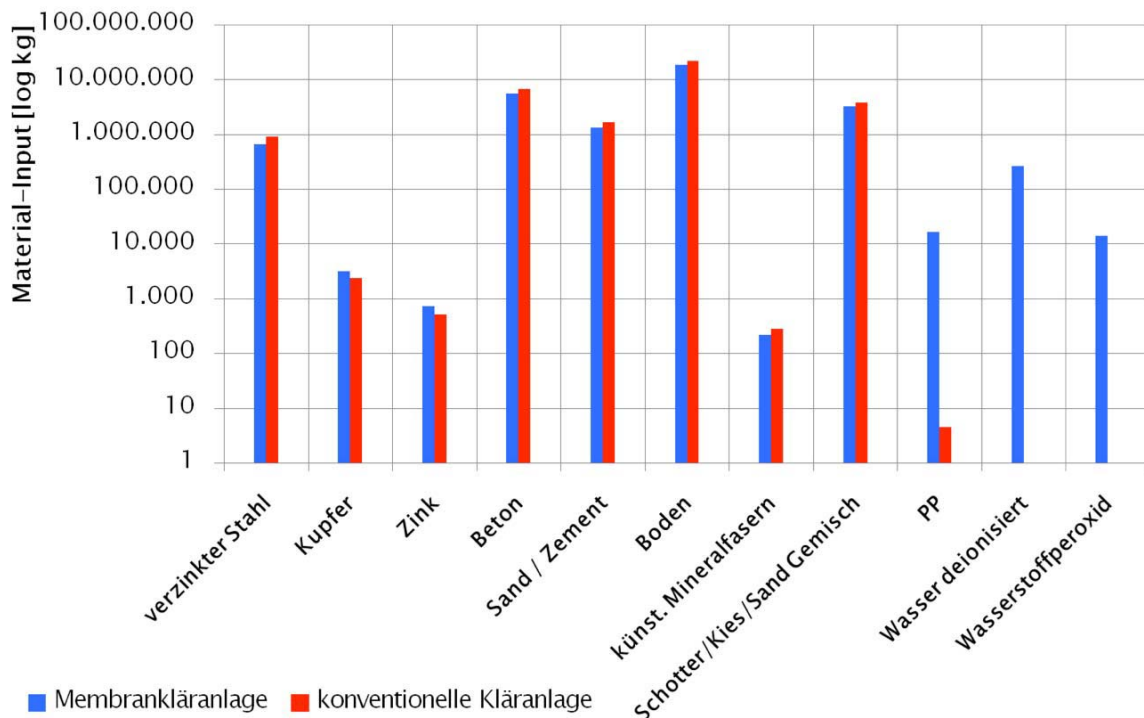


Quelle: Leck 2010

3.3.3 Materialvergleich

Wird ein Aufkommensvergleich der Materialien der beiden Anlagentypen aufgestellt, so werden einige Unterschiede deutlich. Die primären Unterschiede liegen in dem stark erhöhten Kunststoffanteil von Polypropylen infolge der Membranmodule und deren Reinigung mit Wasserstoffperoxidlösung (hier getrennt in konzentriertes Wasserstoffperoxid und Wasser). Die Membrananlage benötigt weiterhin weniger verzinkten Stahl, infolge des Wegfalls der Nachklärung. Ferner ist infolge der geringeren Flächennutzung auch der Anteil der Bodenbewegungen, sowie des Sand / Zement- und Beton- aufkommens, als auch des Schotter / Kies / Sandgemisches geringer (s Abb. 2). Infolge des erhöhten steuerungstechnischen Aufwandes der zum Betrieb der Membrananlage nötig ist, erhöht sich ebenfalls der Kupfer- und Zinkanteil infolge der verbauten Elektrokomponenten. (s. Leck 2010)

Abb. 2: Aufkommensvergleich der wichtigsten Materialien (log. Darstellung)



Quelle: Leck 2010

3.3.4 Potenziale bei der Nutzung und Anwendung

Die Membrantechnologie birgt viele Vorteile, gerade durch ihr enormes Filtervermögen ist sie heute das Maß der Dinge um sauberes Trink- wie auch Abwasser zu erhalten (s. Leck 2010). Weitere Einflussfaktoren und Potenziale die eine Entwicklung begünstigen sind in den nachfolgenden Kapiteln aufgeschlüsselt.

Ressourceneinsatz

Der Ressourceneinsatz beim Neubau einer Kläranlage auf Basis von konventioneller mechanisch-biologischer Reinigung ist sehr hoch. Verursacht wird dies, wie die Berechnung in dieser Arbeit gezeigt hat, maßgebend durch den sehr hohen Anteil an Bodenbewegung sowie an der verbauten Menge von Beton, sowie der Schotter / Kies / Sandgemische. Dieser enorme Materialbedarf kann jedoch mittels Membrantechnologie gesenkt werden. Da für die Klärung mittels Membranbioreaktoren eine Nachklärung nicht länger erforderlich ist, wird ein nicht geringer Teil an Bodenbewegungen und Baumaterialien durch den Wegfall des Nachklärbeckens eingespart.

Ressourceneffizienzpotenzial

Das Ressourceneffizienzpotenzial ist bei der Membrantechnologie im Vergleich zur konventionellen Klärung deutlich höher. Nicht einzig und allein aufgrund von direkten Einsparungen im Bereich der Baumaterialien und Bodenbewegungen, sondern viel-

mehr durch die Steigerung des Feststoffanteils im Belebungsbecken, was eine bessere Abbauleistung von Schadstoffen ermöglicht.

Umweltauswirkungen

Mit einem MBR Klärung können Schadstoffe komplett zurückgehalten werden und eine Badewasserablaufqualität erreicht werden. Dies erfordert jedoch eine elektrische Leistungsmehraufnahme von ca. 40 %, welche je nach Art der Bereitstellung ebenfalls wieder Umweltbelastungen hervorrufen. Eine sinnvolle Kopplung von regenerativen Energien wie beispielsweise Offshore- und Onshore-Windanlagen sowie eine intensivere Fokussierung auf energieautarke Lösungen ist damit sinnvoll und zu favorisieren. Dies gilt vor allem für die energetische Nutzung von Klärschlamm und Klärgas aus Klärschlamm zur Eigenverstromung bei Kläranlagen. Diese Technologie findet, obwohl technisch ausgereift, noch nicht flächendeckend Anwendung. (s. Leck 2010)

Realisierbarkeit

Eine Membranrealisierung ist nahezu überall möglich. Ein Neubau würde eine Platzersparnis von bis zu 70 % bei gleichbleibender Klärleistung liefern. Auch die Integration von Membranbioreaktortechnologie ist in bestehende Altanlagen sinnvoll, materialeffizient und kostengünstig zu realisieren. Als Beispiel ist hier die Kläranlage in Hutthurm anzuführen, bei der eine Altanlage aus den siebziger Jahren mittels drei VRM Membranbioreaktoren der Firma Huber SE auf Membranklärung umgerüstet wurde. Es musste lediglich ein neues Belebungsbecken neben dem bereits bestehenden errichtet werden, worin die Membranbioreaktoren sowie die Technik untergebracht werden konnten. Das alte Belebungsbecken blieb von den Baumaßnahmen soweit unberührt, dass der Umbau im laufenden Betrieb erfolgen konnte. Das alte Becken dient heute zum Ausgleich von Spitzen im Zulauf, so dass eine kontinuierliche Beschickung der Membranbioreaktoren gewährleistet ist. (s. Leck 2010)

Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung von Membrantechnologie im Vergleich zur konventionellen Reinigung ist augenscheinlich nicht sofort zu erkennen, da die Membrantechnologie in der kommunalen Klärtechnik eine Mehrbelastung an Energie, sowie relativ intensive Reinigungszyklen erfordert (s. Leck 2010). Auf lange Sicht sind jedoch die gleichbleibend hohe Ablaufgüte sowie der geringe Platzbedarf bei maximaler Klärkapazität interessant. Auch die Integration in Altanlagen ist wirtschaftlich betrachtet sehr interessant, da viele Altgebäude und Komponenten ins neue System übernommen werden können (s. Leck 2010). Damit kann deren vollständiger Neubau, der meist sehr kostenintensiv ist, vermieden werden. Gerade in dicht besiedelten Gebieten wo bereits eine Kläranlage existiert, diese aber nicht mehr den Leistungsanforderungen an Klär- und Abwasservolumen entspricht, ist ein Umstieg auf die Membranbioreaktortechnik eine sinnvolle und im Zuge des geringen Platzbedarfs meist unausweichliche Alternative.

Kommunizierbarkeit

Die Membrantechnologie hat im Bezug auf die alt bewährte konventionelle Klärtechnik einige Nachteile. Sie ist eine relativ neue Technologie für die zwar schon einige Anlagen existieren, diese aber auch lange Zeit (meist über einige Jahre) auf die jeweiligen Gegebenheiten vor Ort einjustiert werden müssen, um ihr optimales Potenzial entfalten zu können. Dies schreckt viele Interessenten ab, was jedoch völlig unbegründet ist. Auch wenn die Technologie zunächst noch eingestellt werden muss, ist sie auf lange Sicht die sinnvollste Lösung, um zunehmende Fremdstoffbelastung wie Pestizide und Hormone aus dem Wasserkreislauf zu entfernen (s. Henzelmann 2007; S. 142). Bei einer Erweiterung einer bestehenden Kläranlage ist die Kommunizierbarkeit jedoch besser als bei einem Neubau, da hier mit dem Erhalt von bestehenden Systemkomponenten geworben werden kann, was insbesondere die enormen Bauarbeitskosten und Aushubarbeiten einer Neuanlage vermeidet.

Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Membranbioreaktortechnik auf kommunale Kläranlagen ist prinzipiell ohne Einschränkung möglich. Bei einer Erweiterung einer bestehenden alten Anlage sind jedoch umfassende Betrachtungen anzustellen. Je nach ermittelten Komponenten und situativen Gegebenheiten können Investitionskosten für einen Umbau stark variieren. Ein Neubau mit Membranbioreaktortechnik ist prinzipiell überall dort effizient einsetzbar, wo sehr gute Ablaufqualitäten gewünscht oder gefordert werden (s. Leck 2010).

3.3.5 Stärken und Chancen der Membrantechnologie

Die Stärken, die sich insbesondere für den deutschen Markt ergeben, leiten sich aus den guten Erfahrungen durch Pilotanlagen in Deutschland und der Welt ab. Weiterhin fördern die europäischen Gesetzesänderungen zum Schutz von Trink- und Oberflächenwasser mit ihren Anforderungen an die Gewässerqualität die Investitionsbereitschaft von Kommunen und Gemeinden, da diese an die Gesetzänderungen gebunden sind (Henzelmann 2007). Eine explizite Erwähnung der Membrantechnologie als favorisierte technische Lösung für Wasseraufbereitung in Gesetzform ist nötig (Henzelmann 2007; S. 153). Insbesondere die Möglichkeiten der kompakten Anlagentechnik, die mit Membranen erreicht werden können, bieten enorme Chancen im Bereich der dezentralen Wasserbehandlungen. Das Erreichen des Millennium Development Goals¹ der Vereinten Nationen, ist damit durchaus erreichbar (s. Henzelmann 2007). Ein weiterer expandierender Markt stellt China und Indien dar. Ihre stetig und rasant wachsende Bevölkerungszahl und die damit verbundene Notwendigkeit an effizienter und moderner Technologie zur Wasserfiltration, gerade auf dem Abwassersektor, ermöglicht den deutschen Herstellern enorme Marktchancen. Das Interesse an Technologie aus Europa und insbesondere Deutschland ist sehr groß, zumal eine stetig wachsende

¹ Bis ins Jahr 2015 eine Halbierung des Anteils der Menschen zu erreichen, die keinen dauerhaften Zugang zu sauberem Trinkwasser besitzen.

Zahl von Pilotprojekten auch und gerade durch finanzielle Förderung der Regierungen vor Ort, ein sicherer Indikator für ein Umdenken darstellen.

3.3.6 Schwächen und Risiken der Membrantechnik

Insbesondere die national sehr unterschiedlichen Zulassungsbedingungen, die sich bereits innerhalb der Europäischen Union zeigen, behindern die technische Entwicklung und die Marktetablierung. Eine breite Durchdringung des Nachfragemarktes, der Interesse an dieser kostenintensiven Technologie hat, ist nicht gegeben. Vielmehr sind lokal vereinzelnde Hochburgen verbreitet. Dies erfordert zumeist aufwendige nationale Wachstumsstrategien um einen wirtschaftlichen Anreiz zu setzen. Auch die mögliche Verlagerung der Wertschöpfungskette ins Ausland ist eine Gefahr für etablierte mittelständische Unternehmen, die im Falle einer Übernahme durch Großunternehmen wenig tun können. Ebenso steigen der Grad der technischen Ausbildung und das Verständnis für diese Art der Zukunftstechnologien insbesondere im asiatischen Raum, was zu zunehmender Konkurrenz führt. Im Zuge dessen sind Patentrechtverletzungen und das Kopieren von technischen Anlagenspezifikationen gerade im chinesischen Bereich möglich (s. Henzelmann 2007).

3.3.7 Hemmnisse und weitere Handlungsempfehlungen

Fehlende Investitionsbereitschaft, insbesondere bei den Kommunen, aufgrund der angespannten Wirtschafts- und Finanzlage der öffentlichen Kassen, sowie mangelnde offensive Informationspolitik der Anlagenhersteller hemmen die Marktentwicklung (s. Henzelmann 2007). Die schleppende Übernahme der europäischen Trinkwasser- sowie Gewässerschutzverordnungen in deutsches Recht haben die Entwicklung und das Marktpotenzial stark behindert. Konsequente Kontrollen der Schadstoffobergrenzen bei der Einleitung von gereinigtem Trinkwasser und ein funktionierender Sanktionsmechanismus bei Verstößen sind bundesweit erforderlich. Denkbar wäre auch ein bundesweites Förderprogramm, um Membrantechnologie im Abwassersektor und die Potenziale dieser Technologie zeitnah auch auf kommunaler Ebene einsetzen zu können. Weiterhin sollten die interdisziplinäre Forschung und der Austausch zwischen Universitäten und Unternehmen erhöht werden (s. Henzelmann 2007).

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Membrantechnologie in Kläranlagen der Größenklasse 3 mit deutschlandweit fast 30 Megatonnen ein großes Ressourceneffizienzpotenzial besitzt. Neben dem hohen Reinigungsvermögen und dem damit verbundenen Beitrag zum Natur- und Gewässerschutz sowie unter dem Gesichtspunkt von europäischen Gewässerschutzverordnungen, ist der verbreitete Einsatz der Membrantechnologie in der Wasserfiltration erforderlich. Es besteht gegenüber modernen konventionellen Anlagen ein Ressourceneffizienzpotenzial. Für die weitere Entwicklung sollten umfassendere Betrachtungen und Datenerhebungen an einer Modellanlage stattfinden, um eine gesamtbilanztechnische (variable Auslastung;

Sommer / Winter Zyklen und deren Einfluss; etc.) Abbildung einer Kläranlage mit Membranbioreaktoren zu ermöglichen.

Um eine Übertragbarkeit der Bilanzierung auf alle 5 Größenklassen zu ermöglichen, sollte für die weitere Zukunft eine umfassende gesamtbilanztechnische Analyse der übrigen 4 durchgeführt werden und mittels Faktorplänen eine Identifizierung der signifikanten Steuergrößen erfolgen. Weiterhin sind die in dieser Arbeit bilanztechnisch nicht erfassten Möglichkeiten der Faulgasgewinnung und Nutzung in BHKWs sowie der weiteren Schlammverwertung zu überprüfen, um auch die Energieeffizienz optimieren zu können. Weiterhin sollte die Ressourceneffizienz infolge von Wärmerückgewinnung aus Abwasser untersucht werden. Studien zufolge könnten damit 5-10 % aller Haushalte mit Wärme versorgt werden (Leck 2010; Behrendt 2009). Daraus ergeben sich weitere Optimierungspotenziale der bestehenden Systeme und die damit verbundenen Effizienzsteigerungen. Insbesondere durch die gemeinsame mess- und regelungstechnische Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage wird die Ausnutzung von Systemreserven erhöht, was neben einer Verbesserung des Gewässerschutzes auch zu Kosteneinsparungen führt.

Auf dem Gebiet der Trinkwasseraufbereitung gewinnt die Membrantechnologie immer stärker an Bedeutung, da gestiegene hygienische Anforderungen in vielen Fällen eine filtrative Entfernung von Mikroorganismen aus dem Wasser erfordern. Hauptvorteile der Membrantechnologie sind die gute Energiebilanz und die nahezu vollständige Entfernung der Trübstoffe aus dem Rohwasser, unabhängig von dessen Trübstoffgehalt. Die Zugabe von Chemikalien ist in der Regel nicht nötig, da auch pathogene Keime und Viren mittels Ultrafiltration zurückgehalten werden (s. Leck 2010; S. 11 ff.).

Die wachsende Nachfrage nach Techniken zur Kreislaufschließung in der Industrie aufgrund steigender Preise für Wasser und Abwasser und den Anforderungen zur Wertstoffrückgewinnung fördern den Einsatz der Membrantechnologie gerade im Bereich der Prozesswasseraufbereitung (s. Henzelmann 2007). Daneben können Membranen auch zur Entsalzung und Enthärtung von Trinkwasser eingesetzt werden (s. DVGW Technologie Report 2008). Das Potenzial auf dem Gebiet der Meerwasserentsalzung sowie der Wiederaufbereitung von gebrauchtem Wasser (Betriebswasser mit Mindesthygiene) ist ein Zukunftsmarkt und sollte weiter untersucht werden. Insbesondere in südlicheren Regionen Europas wie Spanien, Griechenland und Italien, sowie Afrika, dem nahen Osten, Indien und China, werden die Trinkwasserressourcen infolge der Bevölkerungsentwicklung immer schneller verbraucht. Um den steigenden Bedarf zukünftig decken zu können, ist neben effizienterer Reinigung und Wiederaufbereitung auch eine zunehmende Gewinnung aus Meerwasser von essenzieller Bedeutung.

Unter den hier dargelegten Gesichtspunkten ist die Membrantechnologie und deren Anwendung auf dem Gebiet der Wasserfiltration zu empfehlen.

3.5 Quellenverzeichnis

- Behrendt, S. (2009): Integrierte Roadmap Automation 2020+.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (2010): DVGW Technologie-Report Nr. 3/08. URL <http://www.dvgw.de/angebote-leistungen/forschung/technologie-report/aufbereitung/ausgabe-308/>. – Stand: 11.03.2010
- Henzelmann, T. ; Mehner, S.; Zelt, T. (2007): Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Leck, M. (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen im Bereich der Wasserfiltration durch Membrantechnologie, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse.
- Pfaffinger, J. Baunternehmung GmbH ; Göger, S. (2010): Datenmaterial, Auskunft.
- RWTH - Aachen, ISA - Institut für Siedlungswasserwirtschaft: Membrantechnologie: Die Schlüsseltechnologie der Zukunft. URL http://www.isa.rwth-aa-chen.de/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=194&Itemid=140. – Stand: 14.03.2010
- Umweltbundesamt (2009): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen.
- Universität Oldenburg, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften (2010): Hydrologie - Wasserverbrauch. URL <http://www.hydrologie.uni-oldenburg.de/ein-bit/11686.html>. - Stand: 12.03.2010

4 Ressourceneffiziente Energiespeicherung: Vergleich von direkter und indirekter Speicherung für elektrifizierte PKWs

Alain Heynen (RWTH Aachen, Studiengang Entsorgungswesen)

Eberhard Büttgen (RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft)

4.1 Einleitung

Effiziente Speichertechnologien für Strom aus regenerativen Quellen wie Wind und Sonne, deren Anteil am Strommix zunehmen wird, sind vor dem Hintergrund der unsteady und nicht bedarfsadäquaten Verfügbarkeit unumgänglich für eine nachhaltige und gesicherte Energieversorgung. Den elektrifizierten Fahrzeugen wird ein hoher Stellenwert als direkter und indirekter Stromspeicher resp. Stromlieferant zugewiesen. Lithium-Ionen-Akkus und Brennstoffzellen (BSZ) sind Energielieferanten für den Antrieb, können aber durch intelligente Anbindung („smart grid“) auch Strom ins Netz einspeisen.

Die derzeit effizienteste direkte Stromspeicherung erfolgt durch Aufladen von Lithium-Ionen-Akkus, die zwar eine im Vergleich zu anderen Akku-Typen hohe Energiedichte und geringe Verluste aber Nachteile wie lange Ladezeiten, Überhitzung, kontinuierlicher Kapazitätsverlust u.a. aufweisen. Um Fahrzeuge rein elektrisch auf langen Strecken anzutreiben, sind unverhältnismäßig große und schwere Akkus notwendig.

Die temporäre Speicherung von Strom durch Produktion von Wasserstoff und anschließender Stromerzeugung in der Brennstoffzelle ist ein Sekundäreffekt, der mit großen Energieverlusten durch Umwandlung, Verdichtung und Lagerung des Wasserstoffes verbunden ist. Die Reichweite wasserstoffbetriebener Fahrzeuge ist dagegen größer als bei rein akkugestützten Fahrzeugen.

4.2 Vorgehensweise

Da die bereits genannten Technologien zur temporären direkten und indirekten Stromspeicherung im Automobilbereich mit verschiedenen Ressourcenverbräuchen behaftet sind, wurde das Ressourceneffizienzpotenzial auf Basis des MIPS-Konzeptes ermittelt. Grundlage der Analyse war hier der direkte Vergleich der Antriebsenergiebereitstellung für ein Elektrofahrzeug mit Benzinzusatzaggregat und ein Fahrzeug mit Brennstoffzelle. Beide Fahrzeuge sind rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die sich in der Bereitstellung der benötigten Antriebsenergie Strom unterscheiden. Im Gegensatz zum Brennstoffzellenfahrzeug, bei dem der Antriebsstrom nur aus einem Aggregat stammt (Brennstoffzelle), sind beim Elektrofahrzeug neben dem Akku noch ein Benzinmotor vorhanden, der bei Bedarf zur Reichweitenverlängerung den Akku wieder auflädt.

Die im Folgenden untersuchten Fahrzeuge werden bereits in einer Vorserie produziert und sollen in den nächsten Jahren serienreif auf den Markt kommen.

4.2.1 Untersuchte Technologien

Untersucht werden in der Arbeit der Opel Ampera und die Mercedes-Benz B-Klasse „F-Cell“. Beide Fahrzeuge zeichnen sich durch eine vergleichbare Leistungsklasse und Fahrzeuggröße aus, die jeweilige Reichweite ist für Mittelstrecken ausgelegt.

Tab. 5: Eckdaten der untersuchten Technologien / Fahrzeugtypen

Fahrzeug	Opel Ampera	Mercedes-Benz B-Klasse „F-Cell“
Antriebskonzept	E-REV (extended-range electric vehicle)	Brennstoffzelle
Antriebsaggregat	Elektromotor	Elektromotor
Antriebsenergie	Strom	Strom
Energieversorgung	Batterie + Generator (durch Verbrennungsmotor angetrieben)	Brennstoffzelle
Energiemedium	Strom + Benzin	Wasserstoff
Antriebsleistung E-Motor	111 kW (150 PS)	70 – 100 kW (95-135 PS)
Zusatzaggregat	1,4 l Benzinmotor	
Drehmoment	370 Nm	320 Nm
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h	160 km/h
Reichweite	60 km (Batteriestrom) – 500 km (unterstützt)	385 km
Batterie	Li-Ionen 16 kWh	Li-Ionen 1,4 kWh (zur Speicherung der Brems- energie und zum boosten)
Verbrauch	1,6l/100 km Benzin auf den ersten 100 km (60 km rein elektrisch, 40 km unterstützt) 4,8l/100 km Benzin ohne Akkuleistung	3,3 l/100 km Dieseläquivalent (nach neuem europäischen Fahrzyklus NEFZ)

Quelle: Heynen 2010

4.2.2 Definition der Service-Einheit

Der Materialinput in kg wird auf die Fahrleistung von 1 km bezogen. Die Service-Einheit ist demnach kg/km.

4.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Bei der Analyse wurden sowohl der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung der jeweiligen Stromspeicher und der Zusatzaggregate betrachtet als auch der Ressourcenverbrauch für die Energiebereitstellung während der Nutzungsphase.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Die Fahrleistung beträgt jeweils insgesamt 200.000 km.
- Es wird die gleiche Lebensdauer der jeweiligen Aggregate über die gesamte Fahrleistung vorausgesetzt. Hier wird eine Lebensdauer von 10 Jahren und somit eine Fahrleistung von 20.000 km pro Jahr vorausgesetzt.

Opel Ampera

- Insgesamt 2.000 Ladezyklen, was einer rein batterieunterstützten Fahrleistung von 120.000 km entspricht.
- 80.000 km werden demnach motorunterstützt zurückgelegt.

Mercedes Benz B-Klasse „F-Cell“

- 100% Fahrleistung über Wasserstoffantrieb. Der Batteriestrom wird zur Versorgung der elektrischen Anlagen (Klima, Steuerung, etc.) verwendet.
- Der Wasserstoff wird dezentral durch Elektrolyse an den Tankstellen produziert. Der spezifische Stromverbrauch beträgt 4,5 kWh/Nm³ H₂ (DLR 2002). Das Verfahren wird bei der Ermittlung des Ressourcenverbrauchs nicht berücksichtigt (mangelnde Datenlage).
- Bei der Kompression des Wasserstoffs und dem Betankungsvorgang entstehen Energieverluste von 16% bezogen auf den Energieinhalt des H₂.
- Die antriebsspezifische Bordelektronik und zusätzliche Aggregate werden auf Grund der mangelnden Datenlage nicht berücksichtigt.
- Infrastrukturen wie Strom- und Wasserstofftankstellen und Versorgungsnetze werden ebenso nicht berücksichtigt, da auch hierfür keine Daten zur Verfügung stehen.

4.2.4 Datenerfassung

Die Zusammensetzungen und Massen der untersuchten Aggregate wurden aus aktuellen Fachzeitschriften und diversen Fachveröffentlichungen zusammengetragen. Da konkrete Datensätze zu den hier beschriebenen Fahrzeugkomponenten nicht vorlagen und veröffentlicht wurden, mussten die fiktiven Stoffanteile aus vergleichbaren Komponenten zusammengesetzt werden.

Für die untersuchten Szenarien, insbesondere zur Nutzungsphase der Automobile, wurden die Energieszenarien von Wiesen 2010 herangezogen.

4.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Nach dem MIPS-Konzept wurden die Materialien und Energieverbräuche über den skizzierten Lebenszyklus in einen spezifischen und absoluten Ressourcenverbrauch überführt. Betrachtet wurden bei den beiden untersuchten Fahrzeugen nur die zur Energiespeicherung und Energiebereitstellung benötigten Aggregate.

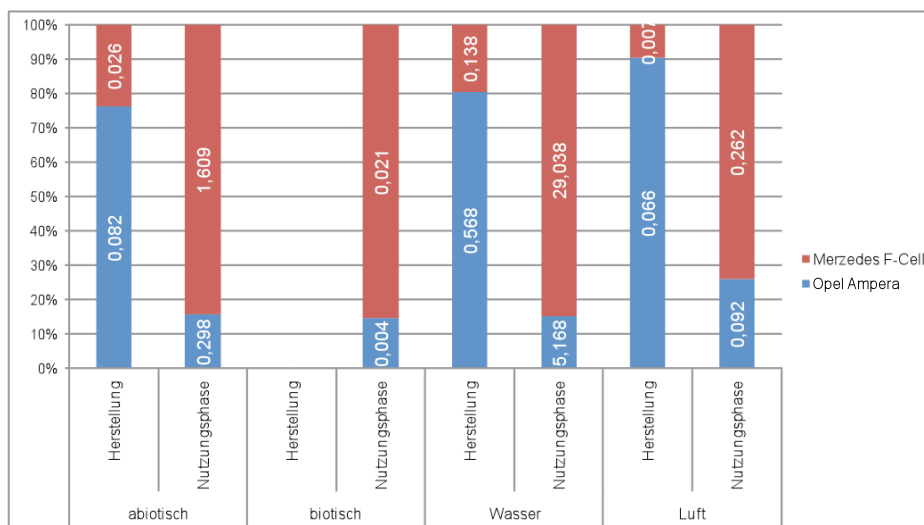
4.3.1 Ressourcenverbrauch des „Speicherkonzeptes“ im Opel Ampera

Die betrachteten Aggregate Li-Ionen-Akku und Benzinmotor verursachen über den Lebenszyklus einen abiotischen Materialverbrauch von 16,4 t, wobei der Akku einen Anteil von nahezu 90% in dieser Kategorie aufweist. Ebenso ist der Akku mit 65% am Wasserverbrauch von 113,5 t und mit 83% am Luftverbrauch von 13,2 t beteiligt. Die Nutzungsphase wird im Kapitel „Potenzialabschätzung“ für beide Speicherkonzepte gemeinsam betrachtet.

4.3.2 Ressourcenverbrauch des „Speicherkonzeptes“ im MB „F-Cell“

Die im Mercedes Benz „F-Cell“ für die Antriebsenergiebereitstellung eingesetzten Aggregate Brennstoffzelle und Li-Ionen Akku bedingen in der Herstellung einen abiotischen Ressourcenverbrauch von 5,2 t, mit einem Anteil der BSZ von 75% (Akku 25%). Der Wasserverbrauch insgesamt beträgt 27,5 t (BSZ 77%) und der Luftverbrauch 1,4 t (BSZ 31%). Der Vergleich der beiden Konzepte in Abb. 3 zeigt einen um 70% (abiotisch), 75% (Wasser) und 90% (Luft) höheren Ressourcenverbrauch bei der Herstellung des Speicherkonzeptes des Opel Ampera, was eindeutig auf die Materialintensität des Akkus zurückzuführen ist.

Abb. 3: Ressourcenverbrauch bei der Herstellung der „Speicher“-Aggregate und durch die Nutzungsphase von 200.000 km im Energieszenario 1 „Strommix 2008“ ; Angabe nach MIPS-Kategorien in kg/km;



Quelle: Heynen 2010

4.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Neben der Herstellung der hier relevanten Aggregate in den Fahrzeugen ist vor allem der Energiebereitstellung während der Nutzungsphase der beiden Fahrzeuge ein wesentlicher Anteil am Ressourcenverbrauch über den gesamten Lebenszyklus zuzuschreiben. Sowohl der Opel Ampera als auch der MB „F-Cell“ sind rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge, wobei einerseits im Opel eine Stromversorgung des Antriebs über Akku und Generator erfolgt und andererseits im MB die Wasserstoff betriebene Brenn-

stoffzelle die benötigte Energie zur Verfügung stellt. Die Strombereitstellung für den Akku des Opels und für die Wasserstoffproduktion wird nach drei unterschiedlichen Szenarien betrachtet:

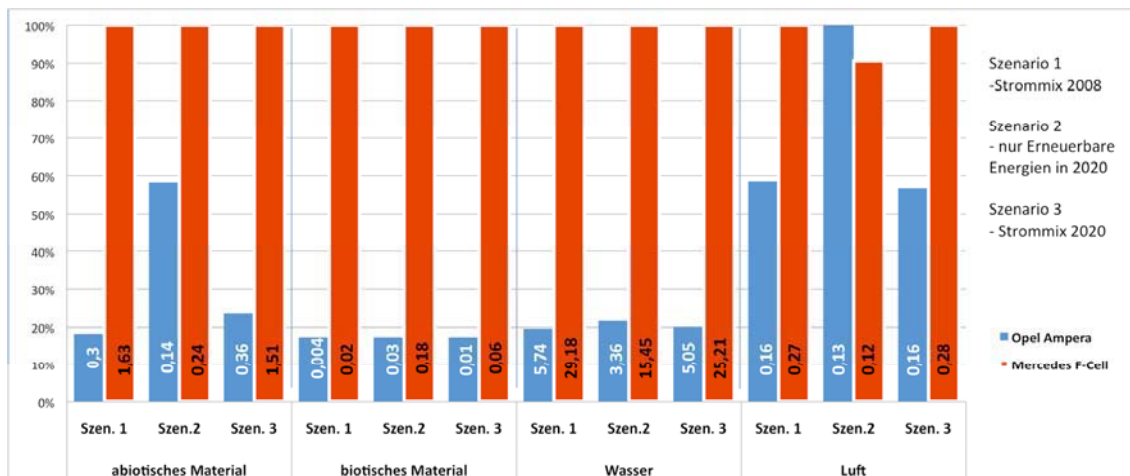
Szenario 1: Strommix 2008 (nach Wiesen 2010)

Szenario 2: Mix Erneuerbarer Energien (EE) 2020 (nach Wiesen 2010)

Szenario 3: Strommix 2020 (nach Wiesen 2010)

Bei allen Szenarien wird Benzin als sekundäre Energiequelle gleichermaßen betrachtet. Es gelten die Annahmen wie in Kapitel 2.3 beschrieben. In Abb. 4 ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der abiotischen und biotischen Ressourcen sowie Wasser das Wasserstoffnutzungskonzept der Brennstoffzelle über alle Szenarien einen deutlich größeren Verbrauch aufweist als beim Elektrofahrzeug. Ein Grund dafür ist eindeutig in der energieintensiven Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse zu sehen. Selbst bei Ansatz eines ausschließlich regenerativen Energiemixes in Szenario 2 ist der Unterschied noch deutlich.

Abb. 4: Ressourcenverbrauch der untersuchten Fahrzeug-Energiekonzepte nach MIPS-Kategorien



Quelle: Heynen 2010

4.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Elektroautos könnten in den kommenden Jahrzehnten eine wichtige Rolle in der Kurzstrecken-Mobilität einnehmen, wenn neue Fahrzeugkonzepte und optimierte Speichertechnologien den derzeitigen Nachteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen aufheben werden. Damit sie auch ressourceneffizient gefahren werden können, müssen die unterschiedlichen Antriebskonzepte weiter optimiert und den Bedürfnissen der Verbraucher angepasst werden.

Derzeit kann sich die Brennstoffzellentechnologie trotz hohem Innovationscharakter noch nicht gegenüber den alternativen Elektrofahrzeugen mit konventioneller Motorunterstützung, wie hier verdeutlicht, behaupten, sowohl hinsichtlich der Ressourceneffizienz als auch der technischen Umsetzbarkeit.

Tab. 6: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten „Speicherkonzepte“

Kriterium	Opel Ampera	Mercedes F-Cell
Ressourceneinsatz	hoch	sehr hoch
Ressourceneffizienzpotenzial	hoch, durch Leistungsoptimierung der Akkus und Nutzung regenerativen Stroms	Hoch, wenn die Optimierung der Wasserstoffproduktion und der Brennstoffzellentechnologie technisch möglich ist
Sonstige Umweltauswirkungen	E-Mobilität nur umweltverträglich, wenn Strom aus überwiegend regenerativen Quellen genutzt wird. Die Speicherfunktion ermöglicht im Verbund einen optimalen Netzausgleich bei hohen Anteilen an Wind- und Sonnenstrom.	Die Wasserstoffbereitstellung ist energieintensiv und mit hohen Verlusten behaftet. Die Lagerung und der Transport sind sicherheitstechnisch nicht unbedenklich (hoher Druck).
Realisierbarkeit	Bis auf die Akkutechnologie sind die Antriebsaggregate ausgereift und serienreif. Die Entwicklung effizienter und preiswerter Li-Ionen-Akkus im Automobilbereich ist die Schlüsseltechnologie. Der Ausbau entsprechender Infrastrukturen und einer intelligenten Netzsteuerung ist notwendig.	Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und die noch nicht geklärten sicherheitstechnischen Probleme sind schwierig und kostenintensiv. Der Wasserstofftechnologie stehen alternative Konzepte wie solare Methanproduktion oder auch die effizientere direkte Stromnutzung in E-Fahrzeugen entgegen.
Wirtschaftliche Bedeutung	Hoch, da die neuen Antriebskonzepte und die entsprechenden Aggregate maßgeblich von deutschen Unternehmen entwickelt werden.	
Kommunizierbarkeit	Gut. Beide Antriebskonzepte finden hohe Beachtung in Politik und Öffentlichkeit. Das Interesse an diesen Fahrzeugen dürfte groß sein, wenn die Technologie ausgereift und zu konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden. Die Verwendung regenerativen Stroms in der Elektromobilität erhöht die allgemeine Akzeptanz und kann langfristig zum Durchbruch dieser neuen Antriebskonzepte führen.	
Übertragbarkeit	Die Ergebnisse können auch auf andere Fahrzeugkonzepte im ÖPNV oder Nutzfahrzeugbereich übertragen werden.	

Quelle: Heynen 2010

4.6 Quellenverzeichnis

Kaltschmitt, M. et al. (2006): Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte

Kolke, R.: Vergleich Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Strassenverkehr. Dissertation

Schubert, E. (2006): Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Hybridfahrzeugen mit Hochenergie-Batteriepufferspeichern zur Wertschöpfenden Nutzung von regenerativem Überschussstrom

Dinkelacker, F. (2007): Brennstoffzelle – Eine angewandte Thermo-Ökonomische Bilanz

Friedrich et al.: Werkstoffe und Bauweisen neuer Fahrzeugkonzepte

„Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“ (2010): Tagung am 1. u. 2. Februar 2010 im Haus der Technik in Mainz. Diverse Vorträge

5 Ressourceneffizienzpotenziale bei der Energiespeicherung – ressourceneffiziente Wärmespeicher

Manuela Seitz (Universität Kassel)

Bastian Lang (Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

5.1 Einleitung

Wärme aus erneuerbaren Energien ist häufig an ihrem Entstehungsort nicht direkt oder effizient nutzbar. Um das enorme Potenzial erneuerbarer Energien im Wärmebereich in höherem Maße nutzen zu können, bedarf es der Schlüsseltechnologie Wärmespeicher. Allgemein ist die Materialeffizienz neuer Energiespeichertechnologien noch weitestgehend unerforscht. Ziel dieser Arbeit ist es Referenzsysteme zu identifizieren bzw. zu analysieren die dem aktuellen und dem zukünftigen Stand der Wärmespeicher entsprechen. Dazu werden die Systeme quantitativ und qualitativ nach sieben Bewertungskriterien im Hinblick auf ihre Ressourceneffizienzpotenziale analysiert.

5.2 Vorgehensweise

Zur Analyse der Ressourceneffizienzpotenziale von Wärmespeichern wurde exemplarisch ein konventioneller Warmwasserspeicher als Stahlkonstruktion und alternative Wärmespeicher mit GFK- und PUR-Dämmung sowie ein Latentwärmespeicher mit Paraffin betrachtet.. Um die Ressourceneffizienzpotenziale der Wärmespeicher zu quantifizieren, wurde eine Analyse auf Basis des MIPS-Konzepts durchgeführt.

5.3 Beschreibung der Wärmespeicher

Der konstruierte Warmwasserspeicher aus Edelstahl als Kurzzeitspeicher kann bei einer Temperaturdifferenz von 65 Kelvin einen Wärmeinhalt von 430 kWh im Speichermedium Wasser speichern. Er besteht aus einem einfachen Edelstahltank mit äußerer PUR-Weichschaum-Wärmedämmung² von 100 mm. Sein Speichervolumen beträgt ca. 5,7 m³. Weiterhin ist er mit je einem Wärmetauscher (Edelstahlrippenrohre) im beladenen Solarkreis, den entnehmenden Brauchwasserkreis und dem Heiz-/ Festbrennstoffkesselkreis ausgestattet. Bei Verwendung des Wärmespeichers zur Trinkwassererwärmung ist eine Trennung der Wärme abgebenden Seite und der Wärme aufnehmender Seite erforderlich. Dies ist notwendig weil durch die Verwendung der thermischen Solaranlage und der damit verbundenen Verwendung eines Was-

² PUR = Polyurethan ist ein Kunststoffschaum, der häufig bei der Wärmedämmung Anwendung findet

ser/Frostschutzgemisch die Wärme nicht direkt übertragen werden kann (Durchmischung der Medien) (Vgl. Fisch, N. et al. 2005, S. 31).

Der FLEXSAVE Speicher von der Firma FSave ist modular aufgebaut und hat eine Abdichtung aus hochtemperaturbeständigem Polypropylen (PPH). Zur Wärmedämmung und Einschalung der PPH – Auskleidung werden Polyurethan-Sandwichelemente (PUR) mit Stahl-Deckschichten verwendet. Die Stabilität des Speichers wird durch einen speziellen Stahlkäfig sichergestellt. Das Einsatzgebiet des Speichers liegt im Besonderen in der Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung von Ein- bis Mehrfamilienhäusern (Vgl. FSAVE SOLARTECHNIK GmbH 2009). Auch dieser Speicher ist für einen Wärmehalt von 430 kWh ausgelegt und ist mit drei Wärmetauschern aus Edelstahl ausgestattet.

Der zweite alternative Wärmespeicher ist ein HAASE-Wärmespeicher mit GFK-Dämmung. Die Maße des Speichers stammen vom HAASE-Wärmespeicher T25-58. Er ist nach dem Prinzip Tank-im-Tank-Speicher aufgebaut. Das im Speicher verbleibende Speichermedium sowie der Wärmeüberträger ist wie bei den Vorgängern Wasser. Das Speichervolumen beträgt auch ihm ca. 5,7 m³. Zudem hat er drei Wärmetauscher für die Anschlüsse der Heizung, des Brauchwassers und der Solareinspeisung.

Der Latentwärmespeicher der Firma PowerTank GmbH ist durch die Verwendung von Latentwärmeelementen individuell konfigurierbar. Diese Wärmespeicherzellen beinhalten dem Datenblatt nach pro Zelle 60 kg des Speichermediums Paraffin. Um einen Wärmehalt von 430 kWh zu erreichen, müssen dazu 36 Wärmespeicherzellen verwendet werden. In denen können bis zu drei Wärmetauscher eingebracht werden. Somit hat der gesamte Speicher eine Höhe von 1,8 m und eine Breite sowie Länge von 1,45 m. Durch das Speichermedium Paraffin wird eine Wärmespeicherung auf kleinstem Raum möglich. Der Platzbedarf reduziert sich um 33 % gegenüber einem konventionellen Wärmespeicher bei gleicher Wärmekapazität. Zudem weist der Latentwärmespeicher geringere Auskühlverluste durch die Nutzung von Paraffin auf (Vgl. PowerTank GmbH 2010).

5.3.1 Definition der Service-Einheit

In der Arbeit wird der Materialinput (kg) des jeweiligen Referenzsystems auf eine zu speichernde kWh_{th} bezogen. Auf diese Weise ist eine Vergleichbarkeit der Wärmespeicher gewährleistet.

5.3.2 Analyserahmen und zentrale Annahmen

In dieser Arbeit erfolgt eine Analyse der Wärmespeicher auf ihre Ressourceneffizienzpotenziale. Da Solarkollektoren häufig in Kombination mit Wärmespeichern auftreten, wurde eine bereits durchgeführte Materialintensitätsanalyse zu Solarkollektoren in der Arbeit mit berücksichtigt. Zum weiteren Systemumfeld gehören das Heizsystem und ein weiterer Wärmeabnehmer für das Brauchwasser. Eine Analyse dieser Randsysteme erfolgte nicht, da sie für sämtliche Anlagen ähnlich sind.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Der Aufwand für die Errichtung und die Deinstallation wurden nicht berücksichtigt
- Der Transport der Rohstoffen und Anlagen wurde vernachlässigt
- Es wurde von einer wartungsfreien Nutzung der Anlagen ausgegangen
- Die Lebensdauer allerer Varianten wurde als identisch angesehen

5.3.3 Datenerfassung

Die Ermittlung der Wärmespeichermassen erfolgte anhand der jeweiligen Herstellerangaben. Zur Materialbestimmung sind neben Herstellerangaben auch Literaturwerte und Abschätzungen eingeflossen.

5.4 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

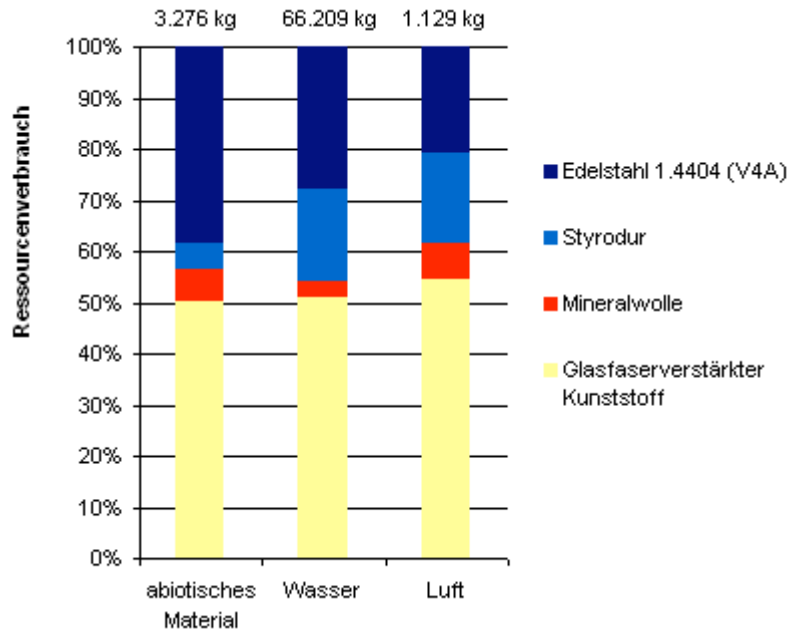
Unter Verwendung des MIPS-Konzepts und den ermittelten Materialien wurde der gesamte Ressourcenverbrauch für die jeweiligen Wärmespeicher berechnet. Die Berechnung der Materialintensitäten hat ergeben, dass die alternativen Wärmespeicher in den drei Kategorien der abiotischen Materialien, Wasser und Luft verschieden große Ressourceneinsparpotenziale gegenüber dem konventionellen Wärmespeicher haben.

Anhand der Datenlage ergab sich, dass zu Herstellung von Wärmespeichern ein sehr geringer Bedarf an biotischen Materialien besteht. Dieser ist allerdings sehr gering, sodass er im Vergleich mit den anderen Kategorien zu vernachlässigen ist. Bodenerosion entstehen, sind von der Menge her allerdings auch zu vernachlässigen.

Der größte Ressourcenverbrauch beim konventionellen Warmwasserspeicher (Standard) in allen drei Kategorien ist dem Edelstahl zuzuordnen. Er verbraucht allein 90 % (6.279 kg) der abiotischen Materialien. Der Ressourcenverbrauch an Wasser beträgt 136.281 kg und 956 kg Luft.

Der Warmwasserspeicher mit PPH – Dämmung (PPH-Speicher) hat ein Gewicht von 6.061 kg und ist somit etwas leichter als der Speicher mit GFK – Dämmung (GFK-Speicher) welcher ein 400 kg höheres Gesamtgewicht besitzt (s. Abb. 5). An Ressourcen verbraucht der PPH-Speicher vor allem Wasser mit 104.412 kg und zudem 2.799 kg an abiotischen Material und 956 kg Luft.

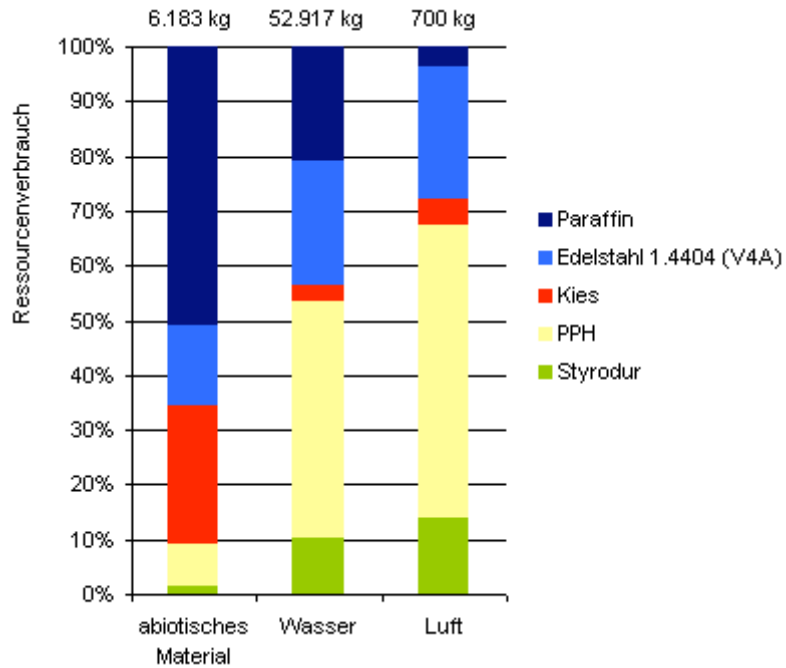
Abb. 5: Ressourcenverbrauch des GFK-Speichers



Quelle: Seitz 2010

Das geringste Gewicht mit 3.460 kg hat der Latentwärmespeicher mit Paraffin (Paraffin-Speicher). Sein Ressourcenverbrauch beträgt 51.136 kg Wasser, 5.663 kg an abiotischen Stoffen und 696 kg Luft (s. Abb. 6).

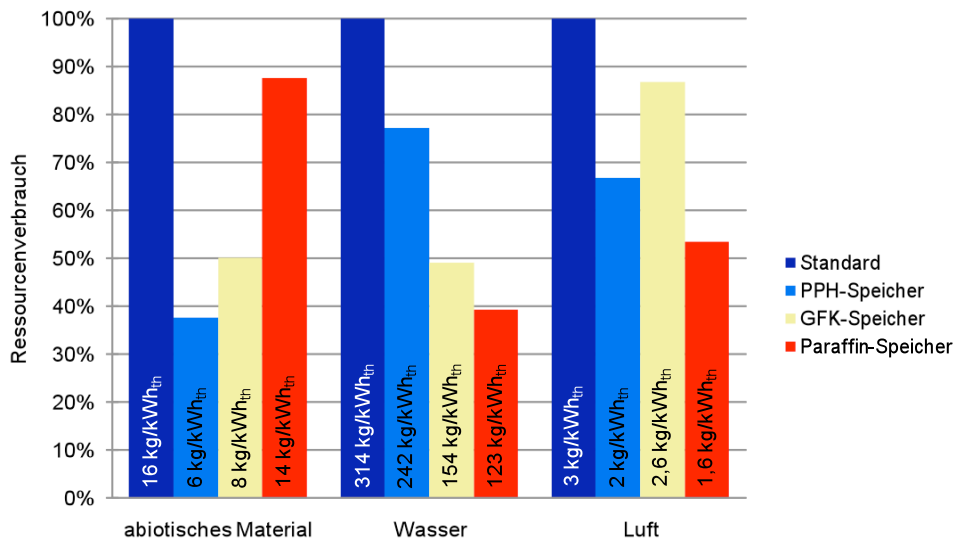
Abb. 6: Ressourcenverbrauch des Paraffin-Speichers



Quelle: Seitz 2010

Die folgende Abb. 7 stellt die gesamten Materialintensitäten der Wärmespeicher pro kWhth (Wärmeinhalt) dar. Der Latentwärmespeicher hat die geringste Materialintensität an Wasser mit 123 kg/ kWh und Luft mit 1,6 kg/ kWh. Der Warmwasserspeicher mit PPH – Dämmung hat den geringsten Ressourcenverbrauch an abiotischen Material mit 6 kg/ kWh.

Abb. 7: Material - Intensität der Wärmespeicher pro kWh_{th}



Quelle: Seitz 2010

5.5 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Die Warmwasserspeicher werden hauptsächlich von Solarthermie-Anlagen gespeist, daher sind in der folgenden Tabelle die MIPS-Werte eines konventionellen Solarkollektors und einem Faktor X Kollektor der Firma GreenOneTec dargestellt. GreeneOneTec-Mitarbeiter versuchten durch konsequente Anwendung der MIPS-Schulung einen völlig neuen Sonnenkollektor herzustellen. Hierbei fand das Prinzip der Materialsubstitution Anwendung, d. h. ein Werkstoff mit hohem ökologischen Rucksack wurde konstruktiv durch ein Material mit geringem ökologischen Rucksack ausgetauscht. (Vgl. Schmidt-Bleek et al. 1999, Seite 58). Dieser virtuelle Faktor X Kollektor weist erhebliche Ressourceneinsparungen gegenüber dem Referenzkollektor auf und würde die Bilanz eines Warmwasserspeichers verbessern. Um die Warmwasserspeicher mit 430 kWh_{th} Energie zu beladen, werden 40 Flachkollektoren mit einer Kollektorfläche von 800 m² benötigt.

Tab. 7: Materialintensität der Herstellung des Referenz- und Faktor X Kollektors

	Eigengewicht (kg)	Material-Input (kg)	Spez. Materialintensität (kg/m ²)
Referenzkollektor	115	9.273	2.318
Faktor X Kollektor	105	1.159	290

Quelle: Schmidt-Bleek et al. 1999, S. 58

Zur Abschätzung des deutschlandweiten Potenzials wurde angenommen, dass 50 % der Einfamilien- und Zweifamilienhaushalte ihre bestehenden Anlagen gegen neue Speichertechnologien ersetzen. Die Zahl der Wohnungen aus dem Jahr 2008 stammen vom Statistischen Bundesamt und dienen als Berechnungsgrundlage zur hypothetischen Darstellung der enormen Potenziale.

Tab. 8: Anzahl der Haushalte in Deutschland (2008)

Haushalte	Anzahl
Einfamilienhaushalte	12.895.410
Zweifamilienhaushalte	4.650.163

Quelle: Seitz 2010

Für die Auslegung der alternativen Wärmespeicher beim Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern zur Warmwasserbereitstellung und Raumheizung wird ein Speichervolumen von durchschnittlich 50 l bis 80 l pro m² Flachkollektor gewählt. Der Kollektor hat dabei eine typische Fläche zwischen 10 m² und 20 m² (Vgl. Oberzig, K. (2008), S. 79).

Die folgenden Wärmespeicher werden daher für einen Durchschnittswert von 80 l bei einer Kollektorfläche von 11 m² ausgelegt. Dies entspricht bei den Warmwasserspeichern mit Wasser als Speichermedium einem Speichervolumen von 880 l und einer Wärmebereitstellung von 66 kWh_{th} für Einfamilienhaushalte und die doppelte Größe (132 kWh_{th}) für Zweifamilienhaushalte. Nachfolgend ist die Hochrechnung dargestellt.

Tab. 9: Einsparungen ggü. dem konventionellen Warmwasser - Wärmespeicher bei den Einfamilienhaushalten (bei einer Auslegung für 66 kWh_{th})

	abiotische Materialien (kg/kWh _{th}) in Mio.	Wasser (kg/kWh _{th}) in Mio.	Luft (kg/kWh _{th}) in Mio.
PPH-Speicher	4.255	30.639	426
GFK-Speicher	3.404	68.088	170
Paraffin-Speicher	851	81.280	426

Quelle: Seitz 2010

Tab. 10: Einsparungen ggü. dem konventionellen Warmwasser - Wärmespeicher bei den Zweifamilienhaushalten (bei einer Auslegung für 132 kWh_{th})

	abiotische Materialien (kg/kWh_{th}) in Mio.	Wasser (kg/kWh_{th}) in Mio.	Luft (kg/kWh_{th}) in Mio.
PPH-Speicher	3.069	22.097	306
GFK-Speicher	2.455	49.105	122
Paraffin-Speicher	613	58.619	306

Quelle: Seitz 2010

Durch den Austausch und mit der Annahme, dass 50 % der Ein- und Zweifamilienhaushalte einen der alternativen Wärmespeicher in Kombination mit einer Solarthermieanlage verwenden würden, sind enorme Ressourceneinsparungen realisierbar. Diese Ressourceneinsparungen werden durch den Ersatz der konventionellen, bestehenden Warmwasserspeicher erzielt, die nach ihrer Verwendung durch neue alternative Wärmespeicher mit geringerem Ressourcenverbrauch in der Herstellung ersetzt werden. Diese Wärmespeicher könnten durch die heute noch im Einsatz befindlichen herkömmlichen Warmwasserspeicher zum Beispiel in Kombination mit einer neuen Solarthermieanlage bei bestehenden Häusern und Niedrigenergiehäusern eingesetzt werden. Sie machen aber keinen Sinn in bei Passivhäusern.

5.6 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Da alle drei Wärmespeicher-Alternativen Einsparungen bei der Materialintensität aufweisen, ist eine weitergehende Förderung und damit einhergehende Verbreitung sinnvoll. Bei dem Latentwärmespeicher mit Paraffin ist zu analysieren, inwiefern das Paraffin in Massen synthetisch herstellbar ist, da es bisher nur als Nebenprodukt der Rohölraffination anfällt. Bei allen Wärmespeichern ist der Einsatz von Kunststoffen zu beachten. Diese sind zum Teil recycelbar, aber dabei findet ein so genanntes Downcycling statt.³ Außerdem sollten die weiteren Arten von Latentwärmespeichern und Sorptionsspeichern mit ihren verschiedenen Speichermedien und Anwendungsmöglichkeiten betrachtet und weiter entwickelt werden. Denn diese Speicherarten enthalten wahrscheinlich ebenfalls große Ressourceneinsparpotenziale. Insbesondere die Bereitstellung mobiler Wärme von Latent – und Sorptionsspeichern ist hier zu nennen. Aber auch Bauteile wie beispielsweise Fassadenelemente, Wände und Decken dienen der Wärme- und Kältespeicherung in Gebäuden. Diese Speicher können zukünftig eine entscheidende Rolle bei der Behaglichkeit des Raumklimas sowie der Energieeinsparung spielen. Es werden zum Beispiel mikroverkapselte PCMs den Baustoffen für Wände beigemischt (Vgl. Informationsdienst, BINE 2009). Produkte mit PCM sind zur

³ Dies ist die Bezeichnung für die Wiederverwertung, bei der sich die Qualität der Rohstoffe mit jedem Recyclingdurchgang verringert. Daher ist im Zusammenhang mit Wärmespeichern zukünftig auch das Recycling von den Materialien wie Kunststoffen zu betrachten.

Zeit vor allem in dezentralen, netzunabhängigen Anwendungen zum Warm- oder Kalt halten zu finden. Bei Boxen zum Transport und zur Zwischenlagerung temperaturempfindlicher Güter dürften PCM-Speichermodule bald zum Standard gehören. Diese Produkte sind schon heute wirtschaftlich (Vgl. Informationsdienst, BINE 2009).

In der Tab. 11 wurden die alternativen Wärmespeicher nach sieben Kategorien der Potenzialanalyse bewertet.

Tab. 11: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten alternativen Wärmespeicher nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Warmwasserspeicher mit PPH - Dämmung	Warmwasserspeicher mit GFK - Dämmung	Latentwärmespeicher mit Paraffin
Ressourceneinsatz	Geringer als beim herkömmlichen Warmwasserspeicher	Geringer als beim herkömmlichen Warmwasserspeicher	Hoch bei dem Verbrauch von Wasser
Ressourceneffizienzpotenzial	Hoch bei den abiotischen Stoffen und bei dem Einsatz von Luft	Hoch bei dem Verbrauch von abiotischen Stoffen und Wasser	Verbrauch des endlichen Rohstoffs Erdöl ist problematisch, Einsatz von Kunststoffe und Stahl
Sonstige Umweltauswirkungen	Verbrauch des endlichen Rohstoffs Erdöl ist problematisch, Einsatz von Kunststoffe und Stahl	Verbrauch des endlichen Rohstoffs Erdöl ist problematisch, Einsatz von Kunststoffe und Stahl	Technisch einfach realisierbar durch modularen Aufbau; Deutschlandweit einsetzbar
Realisierbarkeit	Technisch einfach realisierbar durch modularen Aufbau; Deutschland weit einsetzbar	Technisch einfach realisierbar durch modularen Aufbau; Deutschland weit einsetzbar	Wirtschaftliche Bedeutung des Latentwärmespeichers ist durch seine innovative Art mit Latentwärmezellen hoch
Wirtschaftliche Bedeutung	Marktsegment der großvolumigen Solarpeicher in der Größenordnung von 2 m ² bis 30 m ³	Größten Marktchancen im mittleren Größensegment bei etwa 100 m ³ – 1.000 m ³	Unproblematisch, durch seine Vorteile ggü. dem konv. Wärmespeicher bezüglich Kosten und Platzbedarf
Kommunizierbarkeit	Unproblematisch, durch seine Vorteile ggü. dem konv. Wärmespeicher bezüglich Kosten und Platzbedarf	Unproblematisch, durch seine Vorteile ggü. dem konv. Wärmespeicher bezüglich Kosten und Platzbedarf	Auch in anderen Sektoren einsetzbar (z.B. in der Industrie und in der Klimatisierung in Gebäuden); Speicherung von Energien aus Brennstoffzellen, Stirlingmotoren und Wärmepumpen
Übertragbarkeit	Auch in anderen Sektoren einsetzbar (z.B. in der Industrie und für die Klimatisierung in Gebäuden)	Auch in anderen Sektoren einsetzbar, wie z.B. in der Industrie und Klimatisierung in Gebäuden	Hoch bei dem Verbrauch von Wasser

Quelle: Seitz 2010

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungsergebnisse: Mit den drei untersuchten Wärmespeichern gibt es jetzt und zukünftig effiziente Alternativen, die zudem Ressourceneffizienzpotenziale aufweisen. Sie sind nicht nur in Privathaushalte sondern auch in der Industrie und im Gewerbe einsetzbar, wobei der Latentwärmespeicher die meisten Einsatzgebiete aufweist. Sie helfen zum Beispiel in Kombination mit einer Solarthermie-Anlage und der Verwendung von Solarkollektoren, die Ressourceneffizienz der Wärmebereitstellung zu steigern.

5.7 Quellenverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (Hg.) (2009): Hintergrundinformation. Wärme speichern. FOCUS Online, Online verfügbar unter http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/tid-10069/ewg-studie-wenn-das-erdoel-knapp-wird_aid_303328.html.
- FSAVE SOLARTECHNIK GmbH, FLEXSAVE Produktinformation, Mai 2009.
- Rohn, Holger; Lang-Koetz, Claus; Pastewski, Nico; Lettenmeier, Michael. Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal, März 2009
- Informationsdienst, BINE (20020): Latentwärmespeicher.
- Informationsdienst, BINE (2003): Glasfaserverstärkte Kunststoffe für den Wärmespeicherbau.
- Informationsdienst, BINE (2005): Wärme und Strom speichern.
- Informationsdienst, BINE (2008): Latentwärmespeicher liefert Prozessdampf.
- Informationsdienst, BINE (2009): Latentwärmespeicher in Gebäuden - Wärme und Kälte kompakt und bedarfsgerecht speichern.
- IUTA e.V. Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung; Teil VII: Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung.
- Lettenmeier, M. et al. (2002): MIPS berechnen. Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen.
- Oberzig, K (2008): Solare Wärme. Vom Kollektor zur Hausanlage. Informationsdienst, BINE.
- PowerTank GmbH (2010): Der Latentspeicher.
- Schmidt-Bleek, F.; Manstein, C. (1999): Klagenfurt Innovation. Neue Wege einer umweltgerechten Produktgestaltung. Schulungsprogramm mit 50 KMUs. Alekto Verlag. Klagenfurt.
- Seitz, M (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der Energiespeicherung - ressourceneffiziente Wärmespeicher.

6 Ressourceneffizienzpotenziale von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)

Christoph Schniering (RWTH Aachen)

Eberhard Büttgen (RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft)

6.1 Einleitung

Der mit deutlichem Abstand größte direkte und indirekte Ressourceneinsatz in Deutschland findet im Bausektor statt. Mit 964 Mio. t nimmt dieser Bereich 18% der gesamten Ressourceninanspruchnahme ein (s. Rohn, 2008). Somit ergibt sich aus Steigerungen der Ressourceneffizienz in dieser Branche zwangsläufig eine erhebliche Einsparung.

Gerade im Bereich der energetischen Gebäudemodernisierung sind nachträglich angebrachte Dämmsysteme ein großer Posten im Ressourcenverbrauch.

Ca. 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Beheizung der derzeit 17,6 Mio. Wohngebäude, von denen ca. 75 % vor 1979 gebaut und damit einen niedrigen Wärmedämmstatus aufweisen. Durch die im Bestand erzielbaren Energieeinsparungen durch Wärmedämmmaßnahmen ergibt sich für die nächsten Jahrzehnte ein hoher Sanierungsbedarf und damit verbunden ein nicht unerheblicher Einsatz von Ressourcen, der je nach verwendetem Dämmstoffmaterial und Verbundsystem unterschiedlich ausfallen kann und somit hinsichtlich der Ressourceneffizienz ein Einsparpotenzial ergeben kann.

In der Arbeit wurde der Ressourcenverbrauch zweier Dämmstoffe - die jeweils Bestandteil eines Wärmedämm-Verbundsystems sind - ermittelt und ein Ressourceneffizienzpotenzial bezogen auf die zu dämmende Fassadenfläche in Deutschland berechnet.

6.2 Vorgehensweise

Um die Ressourceneffizienzpotenziale zu quantifizieren, wurde exemplarisch eine Analyse der Dämmstoffe auf Basis des MIPS-Konzeptes für beide Wärmedämmstoffe durchgeführt.

6.2.1 Untersuchte Dämmstoffe

Die Analyse wurde auf zwei expandierte Polystyrol (EPS) - Hartschäume („grau“ und „weiß“) bezogen, die sich durch die Variation der Zusammensetzung (Additive) nur kaum aber in ihrer Wärmedämmleistung merklich unterscheiden: Das Additiv Graphit wird bei beiden PS-Granulaten verwendet, beim Grundstoff für den EPS-Hartschaum

„grau“ jedoch in die PS-Matrix eindiffundiert, was beim Aufschäumen zu einer höheren wärmeabsorbierenden Eigenschaft führt. Dieser Materialgruppe wird ein hohes Marktpotenzial zugesprochen.

Tab. 12: Eckdaten der Dämmstoffe

	EPS-Hartschaum (weiß)	EPS-Hartschaum (grau)
Beschreibung der Dämmstoffe	Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol (konventionell)	Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol (eindiffundiertes Additiv)
Anwendungsbereiche	Außenwände (Wärmedämm-Verbundsysteme, zweischaliges Mauerwerk, Innendämmung, Haustrennwände) Innenwände Dächer (Flach- und Steildächer)	Hauptanwendungsgebiet ist die Fassadendämmung mit Wärmedämm-Verbundsystemen
Rohdichte	22,9 kg/m ³	17 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 0,035 \frac{W}{m \cdot K}$	$\lambda = 0,035 \frac{W}{m \cdot K} \frac{W}{m \cdot K}$

Quelle: Schniering 2010

6.2.2 Definition der Service-Einheit

In der Arbeit wird der Materialinput (kg) auf einen Quadratmeter zu dämmender Fassadenfläche bezogen, so dass eine Vergleichbarkeit mit anderen Dämmstoffen gegeben ist. Dementsprechend wird als Ergebnis der Ressourcenverbrauch mit der Einheit „kg/m²“ ausgewiesen.

6.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Die wesentlichen Informationen zur Darstellung der Energie- und Ressourcenaufwendungen wurden aus den Umwelt-Produktdeklarationen des Instituts Bauen und Umwelt e.V. bezogen (Institut Bauen und Umwelt e.V. 2009). Als Systemgrenze wurde, aufgrund der gegebenen Ähnlichkeit des Aufbaus verschiedener Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS), der unterschiedliche Dämmstoff festgelegt. Die übrigen Bestandteile (Kleber, Dübel, Putz, etc.) sind bei den betrachteten WDVS nahezu identisch und wurden somit vernachlässigt.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Es wurde der komplette Produktlebenszyklus der beiden Dämmstoffe betrachtet. Innerhalb dieses Zeitraums findet kein Austausch der Komponenten statt.
- Die einzelnen Produktzusammensetzungen der Dämmstoffe wurden aus den Produktdeklarationen übernommen.
- Es wurde von einer Dämmstoffdicke von 0,12 m ausgegangen, mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \frac{W}{m \cdot K}$

- Bestandteile mit geringstem Anteil der Zusammensetzung wurden nicht berücksichtigt.
- Einsparpotenziale der Heizwärme, die durch die Verwendung der Dämmstoffe entstehen, wurden gemäß Aufgabenstellung über die gesamte Nutzungsphase nicht berücksichtigt.
- Bei der Analyse wurden die innerhalb der Nutzungsphase anfallenden Wartungsarbeiten und Reparaturen nicht berücksichtigt.

6.2.4 Datenerfassung

Für die Bestimmung der konkreten Zusammensetzung der Dämmstoffe wurden Literaturwerte und Abschätzungen von Experten herangezogen. Einige der zahlreichen Hersteller von Dämmstoffen für Wärmedämm-Verbundsysteme wurden kontaktiert. Aufgrund der jeweiligen Unternehmensinteressen konnten die Hersteller jedoch keine spezifischen Produktinformationen weitergeben.

6.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus der in der Sachbilanz ermittelten Materialzusammensetzung wurde nach dem MIPS-Konzept der gesamte Ressourcenverbrauch für den jeweiligen Dämmstoff berechnet.

6.3.1 Ressourcenverbrauch EPS-Hartschaum (weiß)

Der EPS-Hartschaum (weiß) verursacht über den gesamten Lebenszyklus einen abiotischen Materialverbrauch von 9,632 kg/m². Der Verbrauch an Wasser liegt über den Produktlebenszyklus bei 402,632 kg/m², während die Ressource Luft mit einem Wert von 7,268 kg/m² in Anspruch genommen wird.

Insgesamt treten ein Verbrauch an „biotischem Material“ sowie „landwirtschaftliche Bodenbewegungen“ nur in sehr geringen Maßen auf. Daher bleiben diese Ressourcenkategorien unberücksichtigt (Institut Bauen und Umwelt e.V. 2009b).

6.3.2 Ressourcenverbrauch EPS-Hartschaum (grau)

Über den Lebenszyklus betrachtet verbraucht der EPS-Hartschaum (grau) 6,685 kg/m² abiotische Ressourcen, 294,49 kg/m² Wasser und 5,311 kg/m². Vergleicht man die Werte der beiden Dämmstoffe relativ zueinander, so ergibt sich das in Abb. 8 gegebene Schaubild.

6.3.3 Primärenergieverbrauch EPS-Hartschau (grau und weiß)

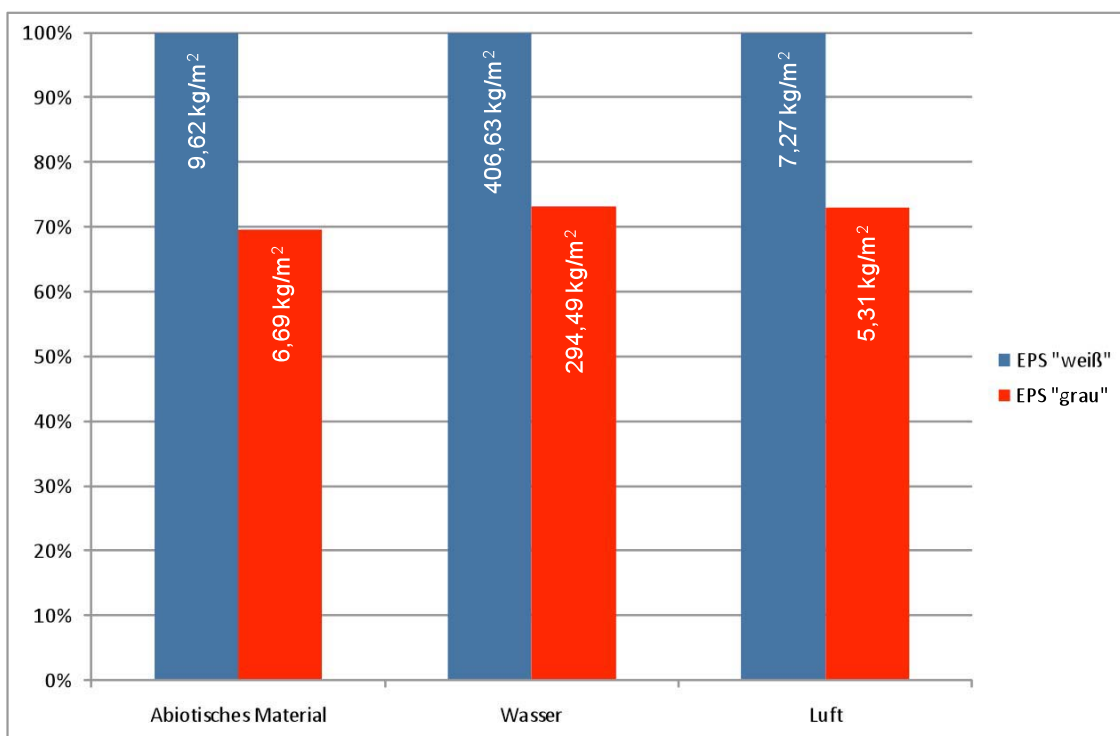
Der Primärenergieverbrauch bei der Herstellung der Dämmstoffe beinhaltet neben der Produktionsenergie und dem Energieaufwand für den Transport der Rohstoffe und Produkte auch das auf dem Energieträger Erdöl basierende Ausgangsprodukt Polystyrol (PS). Je nach Materialzusammensetzung (Dichte) variiert der Massenanteil PS und

damit auch indirekt der Rohstoff Erdöl, der hier als Energieträger in die Gesamtenergiebilanz eingerechnet wird.

Die Entsorgung der Produkte nach Ende der Nutzungsphase wird durch thermische Behandlung erfolgen. Da es sich hierbei um ein hochkalorisches Produkt handelt, ist die thermische „Verwertung“ mit einem Energieüberschuss und damit einer Gutschrift auf den Primärenergieaufwand (Netto-PEA) behaftet.

Der Primärenergieverbrauch wird bei der Abschätzung der Ressourcenverbräuche nicht berücksichtigt, weil eine Unterscheidung nach Energieträgern nicht möglich war. Diese werden gesondert in Tab. 13 ausgewiesen.

Abb. 8: Ressourcenverbrauch der untersuchten Dämmstoffe pro m²-Fassadenfläche nach MIPS-Kategorien



Quelle: Schniering 2010

6.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Im Rahmen der Potenzialanalyse wurde auf zwei Szenarien der zu sanierenden Fassadenfläche eingegangen. Das erste Szenario hat eine ermittelte Fassadenfläche, die anhand des Gebäudebestandes in Deutschland berechnet wurde. Hierbei wurden nur Gebäude betrachtet, die vor 1979 errichtet wurden. Der bisherige Sanierungsstatus wurde berücksichtigt. Im zweiten Szenario wird eine Fassadenfläche aus der Literatur (Werner Riedel, 2007) betrachtet.

Um die Auswirkungen des erhöhten Ressourcenverbrauchs für den EPS-Hartschaum (weiß) im Vergleich zu den Werten des EPS-Hartschaum (grau) zu ermitteln, wurde in Szenario I eine Fassadenfläche von 2,0 Mrd.m² angenommen. Im zweiten Szenario beträgt die Fassadenfläche 1,3 Mrd.m².

Die Potenzialabschätzung geht davon aus, dass

- über 90 % der Wohnfläche in Deutschland, älter als 1979, sich in freistehenden 1- und 2-Familienhäusern, Reihenhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern befindet, die überwiegend die „Hochhaus“-Grenze von 22,5 m unterschreiten (Einsatz von EPS an Fassaden möglich),
- alle bisher ungedämmten Fassaden dieser Wohn-Häuserkategorie, Baujahr älter 1979, zukünftig mit einem der untersuchten Dämmstoffkomponenten ausgestattet werden, da EPS gegenüber den anderen Dämmstoffen, insbesondere den mineralischen, deutliche Vorteile⁴ bietet und
- -der Netto-Primärenergiebedarf (der auch den Rohstoff PS als Produkt der Rohölverarbeitung einschließt) eine Verbrennungsgutschrift enthält, die sich aus der thermischen Entsorgung der Dämmstoffe nach Nutzungsphase ergibt.

Die Auswertung der Potenzialabschätzung (s. Tab. 13) zeigt einen deutlichen Vorteil des EPS-„grau“ gegenüber dem Standard-EPS, der bei den Ressourcen über alle Kategorien um die 30 % beträgt. Ein Vergleich der benötigten Primärenergie ergab eine Einsparung von ca. 23 % mit EPS "grau".

Tab. 13: RessourceneffizienzPotenziale für 1,6455 Mrd.m² Fassadenfläche

Fassade in Mrd. m ²		Primär- energie	Abiotische Materialien	Wasser	Luft
Szenario 1 2,0	EPS (weiß)	273,90 PJ	19,16 Mt	801,64 Mt	14,47 Mt
	EPS (grau)	209,80 PJ - 64,10 PJ - 23,4 %	13,31 Mt - 5,85 Mt - 30,5 %	586,33 Mt - 215,31 Mt - 26,9 %	10,58 Mt - 3,89 Mt - 26,9 %
Szenario 2 1,3	EPS (weiß)	178,81 PJ	12,51 Mt	523,42 Mt	9,45 Mt
	EPS (grau)	136,98 PJ - 41,83 PJ - 23,4 %	8,69 Mt - 3,82 Mt - 30,5 %	382,84 Mt - 140,58 Mt - 26,9 %	6,91 Mt - 2,54 Mt - 26,9 %

Quelle: Schniering 2010

6.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Unabhängig von der tatsächlichen Größe der potenziell zu sanierenden Fassadenfläche ist das Ressourceneffizienzpotenzial bei ausschließlicher Verwendung des „alternativen“ Dämmstoffs EPS „grau“ bedeutend. Nur auf Grund der speziellen Dotierung des Ausgangsmaterials PS mit Graphit und der ansonsten gleichen

⁴ z.B. Formstabilität, mechanische Festigkeit bei kurzer und langfristiger Belastung, nahezu staubfrei bei der Verarbeitung, maßgenaue Anpassung an Fassaden, Dächer, etc. möglich

stofflichen Zusammensetzung liegen die MIT-Werte von EPS (grau) gut ein Drittel unter denen des klassischen weißen EPS. Dem offensichtlich ökologischen Vorteil durch Ressourceneinsparung steht (noch) ein ökonomischer Nachteil durch höhere Bezugspreise entgegen, der aber durch eine Ausweitung der Produktion (Lernkurveneffekt) sowie durch eine Anpassung der öffentlichen Förderungen nach den Kriterien der Energieeinsparverordnung (EnEV) kompensiert werden kann.

Die Verringerung oder Substitution des Treibgases Pentan, das bei beiden EPS-Hartschäumen eingesetzt und bei der Aufschäumung des PS verdampft wird, sollte trotz geringer Klimarelevanz (Abbau in der Atmosphäre) mittelfristig durch Rechtsverordnung oder freiwillige Leistung der Industrie erreicht werden. Hier sind auch weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Substituierbarkeit von Pentan, beispielsweise durch CO₂, erforderlich.

Tab. 14: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Dämmstoffprodukte nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	EPS-Hartschaum (weiß)	EPS-Hartschaum (grau)
Ressourceneinsatz	insgesamt niedrig	
Ressourceneffizienzpotenzial	hoch: durch Verringerung des Heizenergiebedarfs	hoch: zusätzlich zur Wärmedämmung noch Verringerung des Materialeinsatzes gegenüber EPS "weiß"
Sonstige Umweltauswirkungen	Im Brandfall entstehen giftige Stoffe. Bei der Herstellung wird Pentan verwendet (3-fach-höhere Klimaschädlichkeit als CO ₂) und teilweise freigesetzt. PS basiert auf Erdöl (knappe Ressource). Recycling nur bei sortenreinem Material möglich.	
Realisierbarkeit	Als Fassadendämmstoff bis zur Hochhausgrenze (22,5m) erlaubt; 90% aller Wohngebäude möglich.	
	Etabliertes Produkt	Durch die effizientere Dämmwirkung sind geringere Materialstärken möglich, was bei geringen Baugrenzen sinnvoll ist.
Wirtschaftliche Bedeutung	Sehr hoch, da die Wertschöpfungskette überwiegend in Deutschland und sehr oft regional vollzogen wird und es langfristige Auswirkungen auf das verfügbare Einkommen hat.	
Kommunizierbarkeit	Etabliertes Produkt	Sehr gut, insbesondere bei möglicher Zertifizierung der Ressourceneffizienz.
Übertragbarkeit	Auf alle Fassadendämmstoffe auf PS-Basis übertragbar.	

Quelle: Schniering 2010

6.6 Quellenverzeichnis

Institut Bauen und Umwelt e.V. (2009a): Download unter http://bauumwelt.de/download/C22bf5d3bX12622ef92abXY5dec/EPD_IVH_2009211_D.pdf (25.03.2010)

Institut Bauen und Umwelt e.V. (2009b): Download unter http://bauumwelt.de/download/C22bf5d3bX12622ef92abXY5dec/EPD_IVH_2009311_D.pdf (25.03.2010)

Rohn, H. et al. (2008): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien – Erste Ergebnisse. Ressourceneffizienz Paper 1.1

Rohn, H. et al. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2

Schniering, C. (2010): Ressourceneffizienzpotenziale von Dämmstoffen in Wärmedämm-Verbundsystemen.

Werner Riedel, H. O. (2007): Wärmedämm-Verbundsysteme. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

7 Ressourceneffizienzpotenziale der Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland

Klaus Wiesen (HAWK Göttingen / Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

Bastian Lang (Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)

7.1 Einleitung

Die Energiebereitstellung hat einen maßgeblichen Anteil am Ressourcenverbrauch in Deutschland: Im Jahr 2004 wurde hierfür fast die Hälfte des globalen Materialaufwands (TMR) aufgewendet (s. Irrek / Kristof 2008). Daher gilt dieser Bereich als eine der wichtigsten Einflussgrößen zur Steigerung der Ressourceneffizienz.

Erneuerbare Energien spielen eine Schlüsselrolle, um die Ressourceneffizienz der Energiebereitstellung zu steigern (s. Rohn et al. 2009). In der Arbeit wurde der Ressourcenverbrauch relevanter regenerativer Anlagen zur Strombereitstellung im Bereich Windenergie und Biomasse ermittelt und das Ressourceneffizienzpotenzial bezogen auf den aktuellen Strommix untersucht.

7.2 Vorgehensweise

Um die Ressourceneffizienzpotenziale durch Windenergie und Biomasse zu quantifizieren, wurde exemplarisch eine Analyse auf Basis des MIPS-Konzepts für drei Anlagentypen durchgeführt.

7.2.1 Untersuchte Anlagen

Untersucht wurden in der Arbeit der erste deutsche Offshore-Windpark (OFFWP) „Alpha Ventus“, ein fiktiv ausgelegter Onshore-Windpark (ONWP) mit gleicher Anlagenzahl und Leistungsklasse (60 MW) wie „Alpha Ventus“ sowie eine Biogasanlage (BGA) in Westheim (Bayern) mittlerer Leistungsklasse (400 kW_{el}) zur ausschließlichen Stromerzeugung (s. Tab. 15).

Tab. 15: Eckdaten der untersuchten Anlagen

	Windpark „Alpha Ventus“	Onshore-Windpark	Biogasanlage
Beschreibung der Anlage	12 WEA mit je 5 MW, Nabenhöhe 92 m, Jacket-Gründung, Wassertiefe ca. 30 m, Küstendistanz ca. 60 km, Gesamtfläche ca. 4 km, Mittlere Volllaststunden 4.274 h/a	12 WEA mit je 5 MW, Nabenhöhe 117 m, Stahlbeton-Gründung, Gesamtfläche 1,9 km ² , Mittlere Volllaststunden 2.610 h/a	Durchflussverfahren, Fermenter (1.000 m ³), Nachgärer (1.200 m ³), Substratzufuhr 2.750 t/a (Trockenmasse) Substratmix: 60% Mais, 26% Roggen, 10% Gras, 4% Rinderfestmist
Installierte Leistung	60 MW	60 MW	400 kW _{el}
Energieertrag (netto)	220 GWh/a	146 GWh/a	3,1 GWh _{el} /a
Netzanbindung	Hochspannung, 110 kV Drehstrom, Tiefseekabel, Länge 80 km	Hochspannung, 110 kV Drehstrom, Freileitung, Länge 15 km	Mittelspannung, 20 kV Drehstrom, Freileitung, Länge 400 m

Quelle: Auf Basis von Wiesen 2010

7.2.2 Definition der Service-Einheit

In der Arbeit wird der Materialinput (kg) des jeweiligen Referenzsystems auf eine erzeugte MWh_{el} ab Netz⁵ bezogen, so dass eine Vergleichbarkeit mit anderen Stromerzeugungssystemen gegeben ist. Dementsprechend werden als Ergebnis Materialintensitätswerte (MIT-Werte) mit der Einheit „kg/MWh“ ausgewiesen.

7.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Es wurden die Massen und Basismaterialien sowie die Energieaufwendungen über den gesamten Lebenszyklus erfasst. Als Systemgrenze wurden jeweils die Anbindung bis zum Netzanbindungspunkt im Mittel- bzw. Hochspannungsnetz festgelegt⁶.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Die Lebensdauer der Anlagen ist auf 20 Jahre festgelegt. Innerhalb dieses Zeitraums werden alle Komponenten im System miteinbezogen. Der Austausch von Komponenten, die eine kürzere technische Lebensdauer haben, wird in der Nutzungsphase berücksichtigt.
- Der Ressourcenverbrauch für die Herstellung von Halbzeugen und Komponenten wurde über pauschale Fertigungszuschläge ermittelt.
- Der Einbezug der Materialabfälle bei der Produktion erfolgte über pauschale Materialausnutzungsgrade.
- Für jegliche Eisenmetalle wurde angenommen, dass sie aus Primärrohstoffen im Hochofen hergestellt werden.

⁵ Gezählt wird der am Netzanbindungspunkt eingespeiste Strom unter Berücksichtigung der bis dahin auftretenden Umwandlungs- und Übertragungsverluste abzüglich des Eigenbedarfs der Anlage.

⁶ Notwendige Ertüchtigungen am Netzanbindungspunkt (z.B. Übergabestation) oder ein ggf. notwendiger Netzausbau liegen außerhalb der Systemgrenzen.

- Für Maschinen- bzw. Anlagenteile wird der Transportaufwand von Rohstoffen und Halbzeugen zu den jeweiligen Fertigungshallen nicht berücksichtigt.
- In der Rückbauphase werden die Aufwendungen für den Abtransport der Anlagen den Aufwendungen der Errichtung gleichgesetzt.

7.2.4 Datenerfassung

Die Massen der Anlagen bzw. Komponenten wurden bei den jeweiligen Herstellern bzw. Betreibern ermittelt. Für die Bestimmung der Materialien wurden neben Herstellerangaben auch Literaturwerte und Abschätzungen herangezogen (u.a. Tryfonidou 2006). Es erfolgte eine Aufteilung in etwa 20 Materialkategorien, nach denen die einzelnen Komponenten und Bauteile bestimmt wurden. Neben der Anlage selbst wurden Umspannwerk und die Stromleitung bis zum Netzanbindungspunkt analysiert.

Für den Anlagenbau wurden alle Transporte (ohne Transportinfrastruktur) zur Baustelle per Schiff, Bahn oder LKW berücksichtigt. Innerhalb der Nutzungsphase wurden Wartungsarbeiten, anfallende Reparaturen sowie der Eigenenergiebedarf der Anlagen betrachtet.

7.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

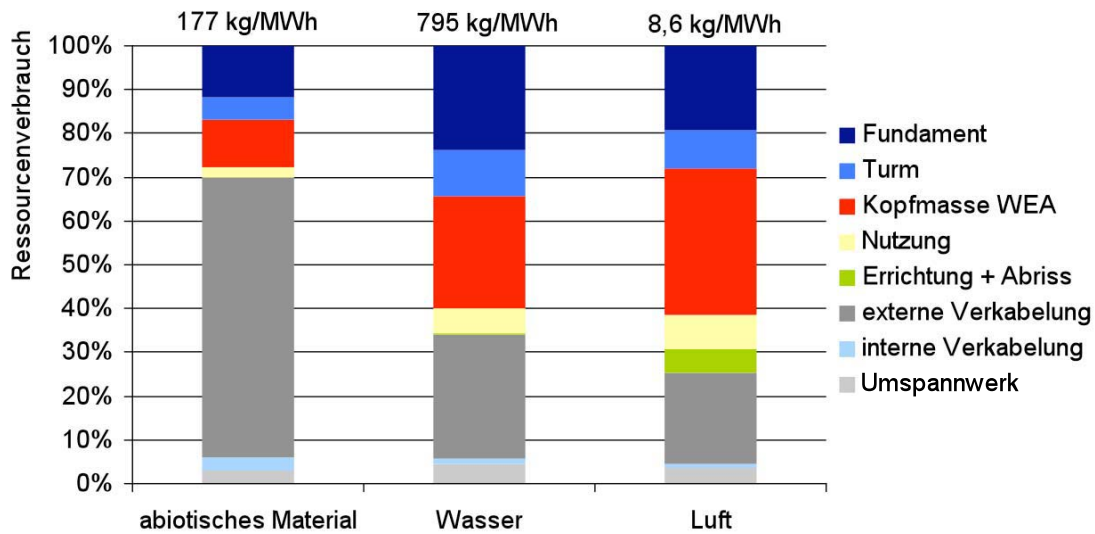
Aus den in der Sachbilanz ermittelten Materialien, Energiemengen und Transportwegen wurde unter Einbezug der vorgelagerten Stoffströme nach dem MIPS-Konzept der gesamte Ressourcenverbrauch für die jeweilige Anlage berechnet.

7.3.1 Ressourcenverbrauch des Offshore-Windparks

Der OFFWP verursacht über den gesamten Lebenszyklus einen abiotischen Materialverbrauch von 7,8 Mt. Eine prozentuale Aufteilung der Stoffströme nach Baugruppen und Nutzungsphasen ist in Abb. 9 dargestellt. In der Kategorie „abiotisches Material“ hat das Drehstromkabel zur Anbindung ans Festland (externe Verkabelung) den höchsten Anteil (64 %), bedingt durch den hohen Kupfer- und Bleianteil. In der Kategorie „Wasser“ und „Luft“ haben die Herstellung von Kopfmasse, Turm und Fundament der Windenergieanlage (WEA) mit rund 60 % den größten Anteil am Gesamtverbrauch (s. Abb. 9). Dies ist durch die hohen Stahl- und Kunststoffmengen bedingt. Die Herstellung von Umspannwerk und interner Verkabelung haben durchweg nur einen geringen Einfluss auf die Stoffströme. Nutzung (Wartung und Reparatur) sowie Errichtung und Abriss sind mit einem Anteil von rund 10 % lediglich in der Kategorie „Luft“ signifikant

Insgesamt treten ein Verbrauch an „biotischem Material“ sowie „landwirtschaftliche Bodenbewegungen“ nur in sehr geringen Massen auf. Daher bleiben diese Ressourcenkategorien in Abb. 9 unberücksichtigt.

Abb. 9: Ressourcenverbrauch und Anteile für Herstellung der Komponenten, Nutzungsphase sowie Errichtung und Abriss an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den analysierten Offshore-Windpark



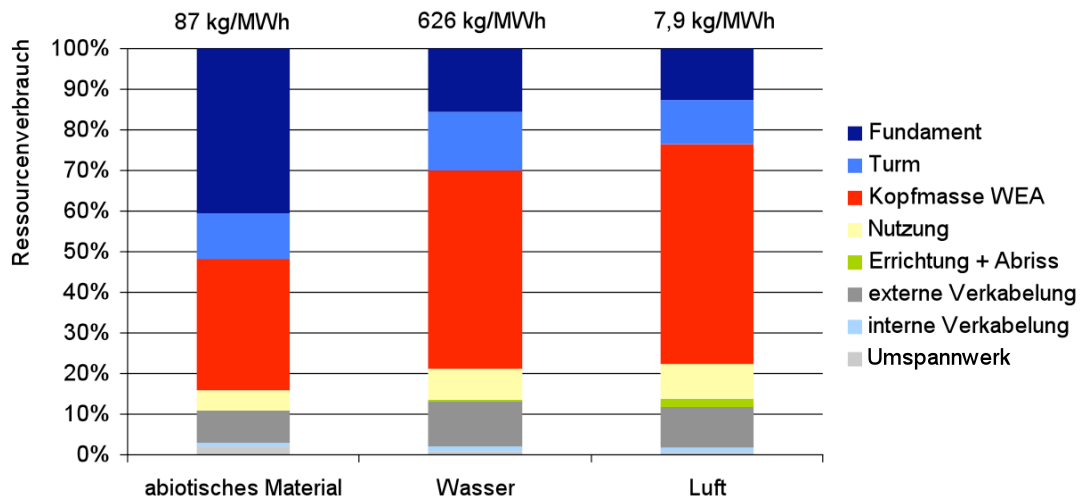
Quelle: Wiesen 2010

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden außerdem der Windpark mit Einsatz von Tripod-Fundamenten sowie eine erhöhte Anlagenzahl (40 WEA) bei unveränderter Infrastruktur der Netzanbindung betrachtet. Hier konnte ein hoher Einfluss des Fundaments und insbesondere der Netzanbindung auf den Ressourcenverbrauch deutlich gemacht werden.

7.3.2 Ressourcenverbrauch des Onshore-Windparks

Über den Lebenszyklus verbraucht der ONWP 2,5 Mt abiotische Ressourcen. Wie in Abb. 10 ersichtlich, überwiegt in allen Ressourcenkategorien der Ressourcenverbrauch der Herstellung der WEA (Kopfmasse, Turm und Fundament). Größere Anteile haben außerdem externe Verkabelung und Nutzung (Wartung und Reparatur). Der Anteil der parkinternen Verkabelung sowie derjenige von Errichtung und Abriss beträgt dagegen durchweg weniger als 3 % und ist somit kaum relevant. Wie beim Offshore-Windpark bleibt der Anteil von Materialien in der Ressourcenkategorie „biotisches Material“ aufgrund der geringen Menge unberücksichtigt.

Abb. 10: Ressourcenverbrauch und dessen Aufteilung nach Herstellung der Komponenten, Nutzungsphase sowie Errichtung und Abriss an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den analysierten Onshore-Windpark

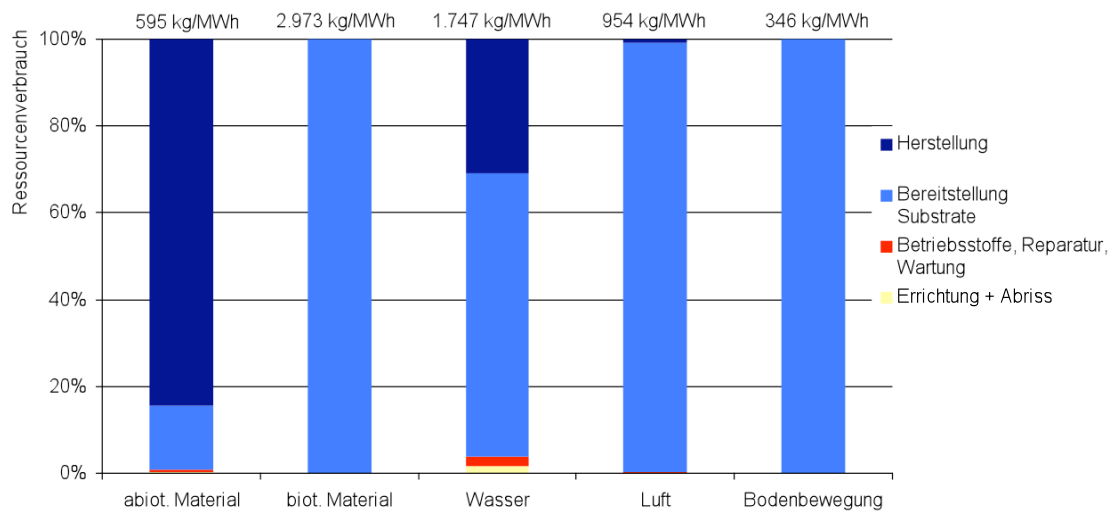


Quelle: Wiesen 2010

7.3.3 Ressourcenverbrauch der Biogasanlage

Der gesamte abiotische Ressourcenverbrauch über den Lebenszyklus der Biogasanlage beläuft sich auf 0,37 Mt. Den größten Anteil hat die Herstellung der Anlage (Baustoffe, Maschinen, E-Technik) mit 84 % (s. Abb. 11), verursacht durch die Beton- und Stahlmassen für die Gärbehälter sowie Asphalt und Schotter für die Lagerflächen und Fahrtwege. In den Ressourcenkategorien „biotische Stoffe“, „Wasser“, „Luft“ und „landwirtschaftliche Bodenbewegung“ dominiert dagegen die Bereitstellung der Substrate und der damit verbundene Dünger- und Treibstoffbedarf. Durch die Sensitivitätsanalyse konnte belegt werden, dass insbesondere die Transportdistanz der Substrate, der Düngereinsatz sowie die Art der verwendeten Substrate einen relevanten Einfluss auf den gesamten Ressourcenverbrauch der Anlage haben (s. Wiesen 2010).

Abb. 11: Ressourcenverbrauch und die Anteile nach Herstellung (Baustoffe, Maschinen, E-Technik), Substratbereitstellung (Substrate, Treibstoff, Dünger), Betriebsstoffe, Wartung und Reparatur sowie Aufwendung für Errichtung und Abriss für die untersuchte Biogasanlage



Quelle: Wiesen 2010

7.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Um die Auswirkungen eines erhöhten Anteils von Windenergie und Biomasse auf den Ressourcenverbrauch des deutschen Strommixes zu ermitteln, wurden zwei Szenarien generiert: Im Szenario 2020 wurde ein Strommix angelehnt an die Prognose des BMU-Leitszenarios (vgl. Nietsch / Wenzel 2009) für das Jahr 2020 erstellt. Hierbei wird angenommen, dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Strombereitstellung bis zum Jahr 2020 von derzeit 15 % (Bezugsjahr 2008) auf 30 % im Jahr 2020 wächst (Szenario „2020“).

Als weiteres Szenario wurde das Szenario „Wind“ erstellt. Darin erfolgt die Prämisse, dass der Anteil der Windenergie am gesamten Strommix von heute 6,6 % (Bezugsjahr 2008) auf 17,2 % (Anteil Offshore 5,4 %) steigt und gleichzeitig die Verstromung von Braun- und Steinkohle um den selben Anteil zurückgeht. Davon abgesehen bleibt der Strommix des Szenarios gegenüber dem aktuellen Strommix unverändert.

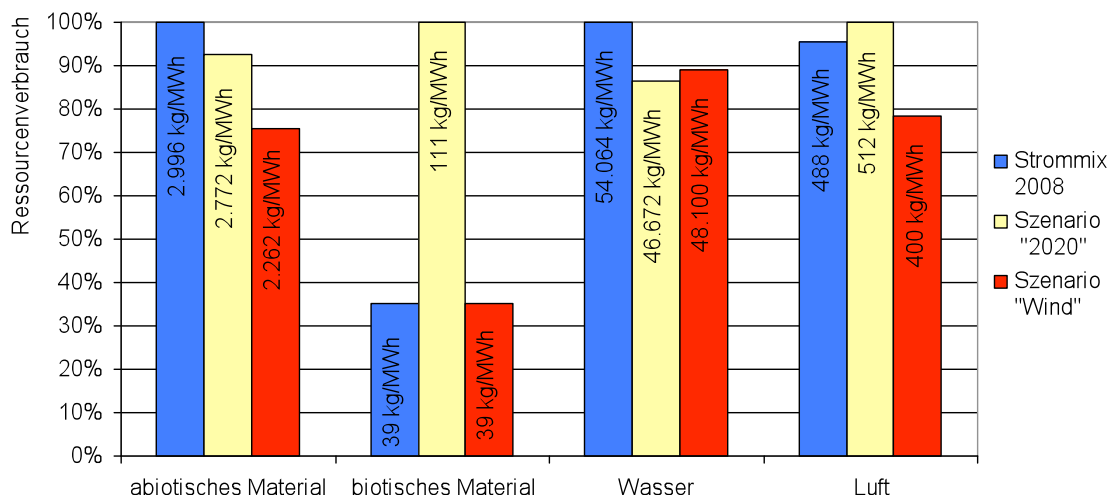
Der aus den Szenarien resultierende Ressourcenverbrauch wurde mit dem des derzeitigen Strommix (Bezugsjahr 2008) verglichen (s. Wiesen 2010): Wie in Abb. 12 dargestellt, sinkt der abiotische Materialverbrauch pro ins Stromnetz eingespeister MWh im Szenario „2020“ trotz des deutlich höheren Anteils regenerativer Kraftwerke nur geringfügig (- 7,5 %). Dies ist darin begründet, dass durch die regenerativen Energien überwiegend Kernkraftwerke substituiert werden. Der abiotische Input von Kernkraftwerken liegt zwar höher als bei WEA, aber um ein Vielfaches niedriger als bei Kohlekraftwerken. Der Anteil von fossilen Kraftwerken an der gesamten Stromerzeugung stagniert dagegen nahezu.

Ein anderes Bild ergibt sich beim Szenario „Wind“: Hier spiegelt sich der niedrige Ressourcenverbrauch der WEA wieder: Insgesamt resultiert aus dem um 10,6 % höheren

Anteil der Windenergie bei gleichzeitigem Rückgang des Braun- und Steinkohleanteils ein um rund 25 % geringerer abiotischer Materialverbrauch pro erzeugter kWh gegenüber dem Strommix 2008. Auch die Inputs in den Ressourcenkategorien Wasser und Luft fallen um 11 % bzw. 22 %.

Die absoluten Einsparpotenziale auf Basis der im Jahr 2008 bereitgestellten Netto-Energie von 587.283 GWh_{el} (ENTSO-E 2008) sind in Tab. 16 dargestellt.

Abb. 12: Vergleich des Ressourcenverbrauchs des eingespeisten Stroms der generierten Szenarien mit dem Strommix des Jahres 2008



Quelle: Wiesen 2010

Tab. 16: Ressourcenverbrauch und Einsparung der untersuchten Szenarien

Absolute Einsparpotenziale				
Szenario	abiotisches Material	biotisches Material	Wasser	Luft
„2008“	1.759 Mt	23 Mt	31.751 Mt	287 Mt
„2020“	1.628 Mt	65 Mt	27.410 Mt	301 Mt
Differenz	- 131 Mt	+ 42 Mt	- 4.341 Mt	+ 14 Mt
„Wind“	1.328 Mt	23 Mt	28.248 Mt	235 Mt
Differenz	- 431 Mt	0 Mt	- 3.503 Mt	- 52 Mt

Quelle: Wiesen 2010

7.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen: Die Nutzung der untersuchten OFFWP und ONWP stellt eine ressourcenschonende Variante dar, um elektrischen Strom zu erzeugen. Das gilt für alle Ressourcenkategorien nach MIPS. Die Biogasanlage erfordert im Vergleich dazu einen deutlich höheren Ressourceninput pro erzeugter MWh (s. Abb. 13).

Insgesamt liegt der Ressourcenverbrauch der Windparks in allen Kategorien niedriger als der der Biogasanlage. Dabei hat der Onshore-Windpark den niedrigsten Ressourceneinsatz. In der Kategorie abiotisches Material beträgt der Verbrauch etwa nur halb so viel wie beim OFFWP „Alpha Ventus“; beim Wasser und Luftbedarf ist der Unterschied weniger gravierend. Allerdings bleibt anzumerken, dass es sich beim untersuchten ONWP um einen fiktiv ausgelegten Park handelt. In der Praxis gibt es bisher keine ONWP mit einer solchen Zahl an Großanlagen. Tendenziell sind zu Land immer weniger neue Standorte mit guten Winderträgen verfügbar, weshalb der Schritt vor die Küste für einen Ausbau der Windenergie wie ihn das BMU-Leitszenario vorsieht (s. Nitsch / Wenzel 2009) zwingend notwendig ist.

Der verglichen mit dem ONWP höhere Ressourcenverbrauch des Offshore-Parks ist durch die notwendigen Ertüchtigungen für die Netzanbindung begründet: Das Drehstromkabel zur Anbindung des Parks an das inländische Stromnetz hat einen Anteil von 64 % am gesamten abiotischen Materialinput des Windparks. Der Ressourcenaufwand für das Umspannwerk ist dagegen kaum von Bedeutung (s. Abb. 10). Bei der Biogasanlage fällt der vergleichsweise hohe Ressourcenverbrauch überwiegend in der Nutzungsphase durch die Bereitstellung der Substrate an. Die Herstellung hat lediglich beim Verbrauch abiotischer Stoffe einen hohen Anteil von 84 % (s. Abb. 11). Eine qualitative Gesamtbewertung unter Einbezug weiterer Bewertungskriterien ist in Tab. 17 zusammengefasst.

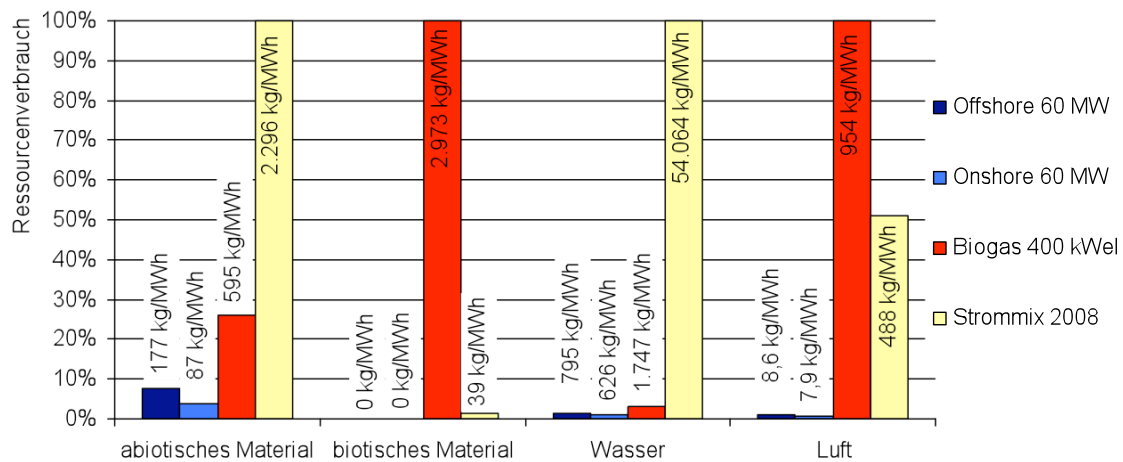
Im Vergleich zum deutschen Strommix 2008 liegt der Ressourcenverbrauch in allen Ressourcenkategorien um ein Vielfaches niedriger (s. Abb. 13). Auch die Biogasanlage ist im Vergleich mit dem deutschen Strommix abgesehen vom Verbrauch biotischer Ressourcen und Luft effizient. Berücksichtigt man eine Wirkungsabschätzung der Treibhausgase, wird offensichtlich, dass trotz des hohen Luft-Inputs die Gesamttreibhausgasbilanz pro erzeugter MWh deutlich unterhalb der eines Gas- und Dampfkraftwerks (Völklein 2008) liegt.

Tab. 17: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Biogas	Windenergie
Ressourceneinsatz	niedrig	sehr niedrig
Ressourceneffizienzpotenzial	Begrenzt durch die zur Verfügung stehenden Anbauflächen der Substrate.	Offshore: sehr hoch. Onshore: hoch. Geringer als Offshore, da bereits viele Flächen mit guten Winderträgen belegt sind, Repowering notwendig.
Sonstige Umweltauswirkungen	Mögliche Einschränkung der Biodiversität durch Monokulturen als Folge des Substratanbaus. Verstärkt wird der Effekt bei erhöhtem Einsatz von Pestiziden und steigender Schlaggröße.	OFFWP: Geräuschbelastung der Meeresfauna durch Bau und Betrieb der Anlage. Auswirkungen der Magnetfelder der Tiefseekabel sowie der Rotoren werden derzeit im Projekt „Research at Alpha Ventus“ erforscht. ONWP: Geräuschbelastung und Schattenschlag.
Realisierbarkeit	Stehen geeignete Anbauflächen für Substrate zur Verfügung, ist der Bau der Anlagen unproblematisch. Technik ist erprobt. Bei Auskopplung von Wärme müssen entsprechende Abnehmer in der Umgebung verfügbar sein. Bei hohem Gülleanteil sind Anwohnerbeschwerden aufgrund von Geruchsbelastung denkbar.	In den für Offshore-Windenergie ausgewiesenen Küstengebieten stellt die Meerestiefe eine große Herausforderung dar. Durch den Salzgehalt von Luft und Wasser ist entsprechender Korrosionsschutz erforderlich. Onshore-Technik ist erprobt. Probleme ggf. durch mangelnde Flächenverfügbarkeit (geringe Winderträge, Anwohnerproteste).
Wirtschaftliche Bedeutung	Wertschöpfungskette im Inland; importierte Substrate aufgrund des langen Transportweges und der geringen Energiedichte der Energieträger kaum wirtschaftlich.	Der Bau von WEA ist international ein großer Markt. Allein durch den anstehenden Bau der OFFWPs in Nord- und Ostsee dürfte die Nachfrage weiter steigen.
Kommunizierbarkeit	Biomasse hat durch die Konkurrenz mit dem Nahrungsmittelanbau ein Imageproblem.	OFFWP mit hoher Akzeptanz in der Bevölkerung, da im Gegensatz zu Onshore-Anlagen bei großem Küstenabstand (wie in Deutschland gegeben) keine optische Beeinträchtigung des Landschaftsbildes entsteht.
Übertragbarkeit	Die Untersuchungsergebnisse lassen sich auf Anlagen mit ähnlichem Substratmix übertragen, die im kontinuierlichen Betrieb (Nass- oder Trockenvergärung) gefahren werden. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung sollten in einer weiteren Studie untersucht werden.	Ergebnisse für OFFWP grundsätzlich auf Windparks mit ähnlicher Küstenentfernung und Wassertiefe übertragbar, solange sie ebenfalls per Drehstrom angebunden sind. ONWP: Ergebnisse sind repräsentativ für Anlagen ähnlicher Leistungsklasse. Zu Land sind auch WEA ohne Getriebe verbreitet, die schätzungsweise einen höheren Ressourcenverbrauch haben und ebenfalls untersucht werden sollten.

Quelle: Auf Basis von Wiesen 2010

Abb. 13: Ressourcenverbrauch der untersuchten Anlagen im Vergleich zum Strommix 2008, jeweils ab Netz (ohne Berücksichtigung von Netzverlusten und Netzinfrastruktur)



Quelle: Wiesen 2010

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz von OFFFWPs sollte in erster Linie die Netzanbindung optimiert werden. Da die Windparks in Deutschland weit vor der Küste gebaut werden, könnte aus ökologischen Gründen statt der Drehstromübertragung eine Anbindung per Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) sinnvoll sein. Um präzise Aussagen bezüglich der Ressourceneinsparung durch eine HGÜ treffen zu können, müsste hierzu eine weitere Materialintensitätsanalyse durchgeführt werden. In Zukunft ist außerdem durch das noch hohe technische Entwicklungspotenzial im Offshore-Bereich eine Effizienzsteigerung bei den Anlagen zu erwarten, insbesondere was die Konstruktion der Tragstrukturen betrifft. Für die BGA lassen sich die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung nur schwer bewerten. Hier treten zahlreiche Rebound-Effekte auf: Wie in der Sensitivitätsanalyse gezeigt, sinkt zum Beispiel durch einen erhöhten Gülleanteil an der Substratzufuhr der Einsatz von Düngemitteln, dafür steigt jedoch der Luftbedarf aufgrund höherer Transportaufwendungen (s. Wiesen 2010).

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungsergebnisse: Angesichts des global steigenden Energiebedarfs und der Dringlichkeit, den Verbrauch von Ressourcen sowie den Ausstoß von Klimagasen einzudämmen, ist eine Steigerung des Anteils der Windenergie an der Strombereitstellung in Deutschland uneingeschränkt zu empfehlen. Auch BGA können helfen, die Ressourceneffizienz der Strombereitstellung zu steigern, wie das Beispiel der untersuchten Anlage zeigt. Dies gilt jedoch nicht pauschal für alle BGA: Der Ressourcenverbrauch muss hier abhängig von der Art der verwendeten Substrate, der Transportdistanz sowie dem Düngerverbrauch und dem damit zusammenhängenden Anbauverfahren individuell bewertet werden.

7.6 Quellenverzeichnis

- European Network of Transmission System Operators for Electricity. Statistical Yearbook 2008. Download unter http://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/ce/Statistical_Yearbook_2008.pdf, (1.04.2010)
- Irrek, W.; Kora, K (2008): Ressourceneffizienz: Warum sie verdient, schneller umgesetzt zu werden. Wuppertal Papers, 176, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Nitsch, J.; Wenzel, B. (2009): Leitszenario 2009` - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Tryfonidou, R. (2006): Energetische Analyse eines Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Netzintegration. Doktorarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2006.
- Völklein, M. (2008): Berechnung des kumulierten Energieaufwands bei der Gewinnung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen. Studienarbeit, Göttingen.
- Wiesen, K. (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der regenerativen Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland. Projektbericht, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse.

8 Ressourceneffiziente großtechnische Energieerzeugung: Potenziale von Desertec-Strom

Tobias Samus (Universität Kassel / Wuppertal Institut)

Bastian Lang (Universität Kassel, Institut für Produktionstechnik und Logistik,
Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)

8.1 Einleitung

Die Verknappung fossiler Brennstoffe einhergehend mit der durch ihre Verbrennung verursachten globalen Erwärmung machen immer deutlicher, dass ein Umbau der Energieversorgung hin zu einer Erzeugung aus erneuerbaren Ressourcen notwendig ist. Dazu müssen dezentrale Stromerzeugungsanlagen ebenso ihren Beitrag leisten wie Großprojekte. Innerhalb der Branche der erneuerbaren Energien wurde in jüngerer Vergangenheit unter anderem das Desertec-Konzept diskutiert. Neben dem Ausstoß von Treibhausgasen sind Ressourcenverbrauch und -verfügbarkeit zentrale Problemfelder. In der dieser Zusammenfassung zugrundeliegenden Arbeit wurde daher das Desertec-Konzept hinsichtlich seines Material- und Ressourceneffizienzpotenzials betrachtet.

Ziel des Desertec-Konzeptes ist es, einen Beitrag zur Sicherung der umweltverträglichen Energieversorgung der EU-MENA⁷-Region beizutragen. Die grundsätzliche Idee ist, die intensive Solarstrahlung in Nordafrika und dem Nahen Osten (s. Abb. 14) für die Elektrizitätsgewinnung mittels solarthermischer Kraftwerke (CSP, Concentrating Solar Power) zu nutzen und diese (teilweise) nach Europa zu transportieren. Im Desertec-Konzept sind jedoch auch Windparks an der nordafrikanischen Atlantikküste vorgesehen sowie die Errichtung eines Backbone-Grids in EU-MENA (vgl. DLR⁸ 2006). Dieses aus Hochspannungsgleichstromleitungen (HGÜ-Leitungen) bestehende Netz würde das europäische Verbundnetz um eine Art „Autobahn“ ergänzen, mit der große Strommengen durch Europa transportiert werden können⁹. Gleichzeitig würden die Netze der MENA-Region mittels einzelner HGÜ-Leitungen miteinander verbunden, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Erweitert wurde das Desertec-Konzept um den Aspekt der regenerativen Meerwasserentsalzung, bei der Abwärme sowie Teile der Solarwärme aus den CSP zur Desalinierung von Meerwasser genutzt werden (vgl. DLR 2007). Zusätzlich wurde schon in einer früheren Studie (vgl. DLR 2006) die Mög-

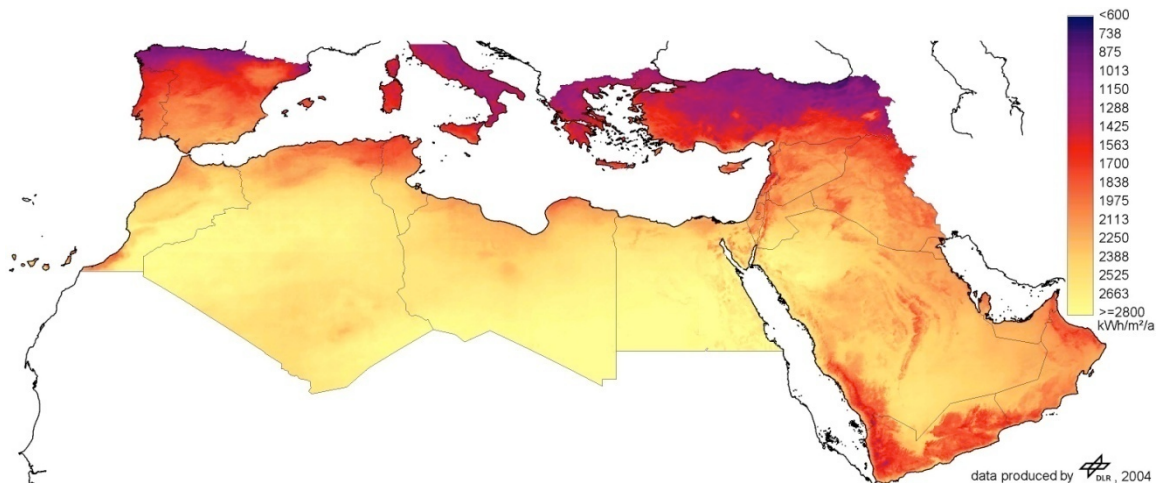
⁷ MENA = Middle East North Africa (Nahe Osten und Nordafrika)

⁸ DLR = Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

⁹ Dies ist beispielsweise bei der Stromgewinnung aus erneuerbaren Energieträgern (vor allem aus Wind und Solarstrahlung) auf Grund deren fluktuierenden Charakters nötig.

lichkeit erwähnt, unter Fresnel-Kollektoren Wüstenland in Ackerland umzuwandeln. Dafür fehlt jedoch bisher eine detailliertere Betrachtung.

Abb. 14: Direktnormalstrahlung (DNI) im südlichen Europa und der MENA-Region



Quelle: DLR 2006

8.2 Vorgehensweise

Desertec zielt auf das Marktsegment der Mittellast bzw. Sekundärregelleistung und Minutenreserve innerhalb des Strommarktes. Da eine abschließende Planung für die Umsetzung des Desertec-Konzeptes (z.B. hinsichtlich Standorte, Technologie, etc.) noch nicht existiert, wird aus der Kombination verschiedener Quellen ein Szenario zusammengestellt: Technologien unterschiedlicher CSP, thermischer Speicher und HGÜ (Hochspannungsgleichstromübertragung) werden mit einer Standort- und Übertragungstrassenanalyse verknüpft. Dies wird mit einem Desertec-Ausbau-Szenario nach DLR 2006 kombiniert und daraus der Strommix der BRD in 2050 mit einem 20 %-igem Anteil an Solarstromimport nach DLR 2006 berechnet. Der Ausbau wird dabei in zwei Schritten betrachtet: zunächst ein Ausbau auf 8 x 5 GW (Gigawatt) Transferleistung im Jahr 2030, dann ein Ausbau auf insgesamt 20 x 5 GW Transferleistung im Jahr 2050.

8.2.1 Untersuchte Technologien

Untersucht werden die drei CSP-Arten Parabolrinne der Bauart Inditep (direktverdampfend), Fresnelkollektor der Bauart Novatec und Solarturm der Bauart Solar Tres (s. Tab. 18) nach Viebahn et al. 2008, da diese nach dem dort entwickelten Szenario die realistischen Ausgangstechnologien für eine breite Massenanwendung darstellen. Ausgestattet sind diese mit einem Phasenwechsel- bzw. Flüssigsalzspeicher zur Wärmespeicherung, um auch ohne Solarstrahlung (nachts) Strom liefern zu können. Zur Übertragung der elektrischen Energie werden 800-kV-HGÜ-Freileitungen bzw. –Seekabel mit einer Übertragungsleistung von 5 GW je Trasse genutzt.

Tab. 18: Übersicht über betrachtete CSP

Kraftwerkstyp		Parabolrinne (Inditep)	Fresnel (Novatec)	Turm (Solar Tres)
Volllaststunden (Solarbetrieb)		6.400	6.400	6.400
Wärmeträgermedium		Wasserdampf	Wasserdampf	Flüssigsalz
Speicherart		PCM ¹⁰	PCM	Flüssigsalz
Speicherdauer (h)		16	16	16
2025	Leistung (MW)	200	200	180
	Gesamtwirkungsgrad (%)	19	11,9	18
2050	Leistung (MW)	400	400	180
	Gesamtwirkungsgrad (%)	19	11,9	18

Quelle: Eigene Darstellung nach Viebahn et al. 2008

8.2.2 Definition der Service-Einheit

Als Serviceeinheit wurde 1 MWh_{el} eingespeist in das UCTE-Verbundnetz bei einer Volllaststundenzahl der CSP von 6.400 h/a festgelegt.

8.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Für die Analyse wurden die Massen und Basismaterialien sowie die Energieaufwendungen nach den Inventardaten in Viebahn et al. 2008 mit kleineren Anpassungen erfasst. Systemgrenze für Desertec ist das UCTE-Netz¹¹. Für die CSP wurde die benötigte Infrastruktur (Straßen, Umzäunung, etc.) nicht erfasst.

Nachfolgend werden die wichtigsten Annahmen vorgestellt:

- Die Systemlaufzeit beträgt 35 (in 2025) bzw. 40 Jahre (in 2050). Komponenten mit abweichender Lebensdauer wurden anteilig berücksichtigt.
- Die Hochrechnung der CSP von der Prototypengröße auf die Szenariengröße (vgl. Tab. 18) erfolgte mit Skalierungsfaktoren aus Viebahn 2004. Die Speicher wurden als linear skalierend mit der Speichergröße angenommen, wobei sich die Speichergröße nach $E_{St} = P_{KW,el} \cdot t_{St} \cdot \eta_{Pb}$ berechnet mit E_{St} = Energiegehalt des Speichers, $P_{KW,el}$ = Leistung des Kraftwerks, t_{St} = Speicherdauer, η_{Pb} = Wirkungsgrad des Generatorenblocks.
- Da für das Fresnel-Konzept nur Inventardaten über das Solarfeld vorliegen, wurden die Inventardaten bezüglich Gebäude, Maschinenteknik, Elektrotechnik, Speicher und Betrieb vom Parabolrinnenkraftwerk übernommen.

¹⁰ Phase-changing material - Phasenwechselmaterial

¹¹ Notwendige Ausbauten am Netzanschlusspunkt (z.B. Übergabestation) sowie der nicht nur durch Desertec notwendige Netzausbau liegen außerhalb der Systemgrenzen.

- Da keine plausiblen Daten für die Errichtung des Fundaments auf Wüstenboden vorlagen, wurde aus Viebahn 2004 der Aushub und der Betonverbrauch je m² Spiegelfläche bestimmt und auf die vorliegenden Anlagen übertragen.
- Die Inventardaten wurden um Transportstrecken nach May 2005 ergänzt, wobei allerdings die Standorte geändert wurden.
- Erste Berechnungen zeigten einen erheblichen Anteil von Kaliumnitrat (KNO₃) als Wärmespeichermedium am Gesamtressourcenverbrauch. Daher wurde für KNO₃ eine eigene Abschätzung der Materialintensität durchgeführt.
- Für das Ende des Lebenszyklusses wurden nur der Energieaufwand für die Demontage bilanziert. Entsorgung und Abtransport wurden nicht betrachtet.
- Für die Bilanz der HGÜs wurden nur die Leitungen betrachtet. Die Transformatoren werden nach May 2005 vernachlässigt. Annahmen über Leitungs- und Transformationsverluste stammen aus Hendriks et al. 2004 und May 2005.
- Tab. 19 zeigt die Ausbaustufen im Desertec Szenario nach DLR 2006. In der Berechnung wurden nur die Zeitpunkte 2030 und 2050 betrachtet.

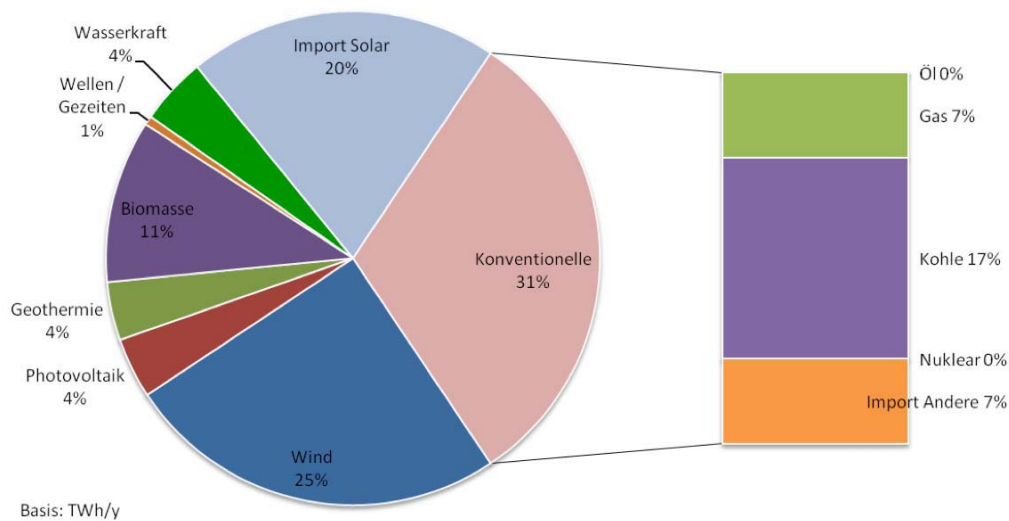
Tab. 19: Szenario des Desertec-Ausbaus

Jahr	2020	2030	2040	2050
Transferleistung gesamt (GW)	2 x 5	8 x 5	14 x 5	20 x 5
Transferenergie gesamt (TWh/y)	60	230	470	700

Quelle: Eigene Darstellung nach DLR 2006

Abb. 15: Strommix in der BRD in 2050 zeigt den angenommenen Strommix in der BRD in 2050. Zusätzliche Annahmen über den Strommix der BRD in 2050 (z.B. Biomasse-Zusammensetzung, Offshorewindanteil, usw.) wurden BMU 2008 entnommen.

Abb. 15: Strommix in der BRD in 2050



Quelle: Eigene Darstellung nach DLR 2006

8.2.4 Datenerfassung

Die Inventardaten der CSP stammen aus Viebahn et al. 2008, die für HGÜ aus May 2005. Standorte und Trassenverlauf sind mit Änderungen May 2005 bzw. Trieb et al. 2009 entnommen. Die Ausbaustufen des Desertec-Konzeptes sowie die Annahmen über den Strommix 2010 und 2050 basieren auf einer Studie des DLR 2006.

8.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus den in der Sachbilanz ermittelten Materialien, Energiemengen und Transportwegen wurde unter Einbezug der vorgelagerten Stoffströme nach dem MIPS-Konzept der Ressourcenverbrauch der einzelnen CSP und der HGÜ-Leitungen ermittelt. Aus der Kombination dieser wird der Ressourcenverbrauch von Desertec bestimmt.

8.3.1 Ressourcenverbrauch der Kraftwerke

Alle untersuchten CSP¹² hier darzustellen ist nicht möglich, daher beschränken sich die folgenden Untersuchungen auf einzelne wesentliche Varianten.

Tab. 20 zeigt den Ressourcenverbrauch am Standort Marokko im Jahr 2025. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Solarturmkraftwerk in sämtlichen Kategorien besser als die anderen CSP abschneidet. Dies bestätigen entsprechende Ergebnisse der Ökobilanzierung in Viebahn et al. 2008. Der höhere Wasserverbrauch des Fresnelkraftwerks erklärt sich durch die größere zu reinigende Spiegelfläche.

¹² Drei verschiedene Konzepte (Parabol, Fresnel, Turm) an drei Standorten (Marokko, Tunesien, Ägypten) an zwei Zeitpunkten (2025 und 2050) resultiert in insgesamt 18 Varianten.

Tab. 20: Ressourcenverbrauch der CSP am Standort Marokko im Bezugsjahr 2025, Technologiebedingte Veränderungen

Kategorie		Abiot. (kg/MWh)	Biot. (kg/MWh)	Wasser (kg/MWh)	Luft (kg/MWh)
Kraftwerksart	Parabol	215,7	0,02	6.423,0	16,3
	Fresnel	197,2	0,02	8.921,1	12,7
	Turm	122,0	0,00	4.870,6	9,3

Quelle: Samus 2010

Die MIPS-Werte der unterschiedlichen CSP variieren je nach Standort, wie Tab. 21 beispielhaft für ein Parabolrinnenkraftwerk im Jahr 2025 zeigt. Diese Veränderung ist vor allem abhängig von der Strahlungsintensität, die zusätzlich angegeben ist.

Tab. 21: Ressourcenverbrauch eines Parabolrinnenkraftwerkes im Bezugsjahr 2025, Standortbedingte Veränderungen

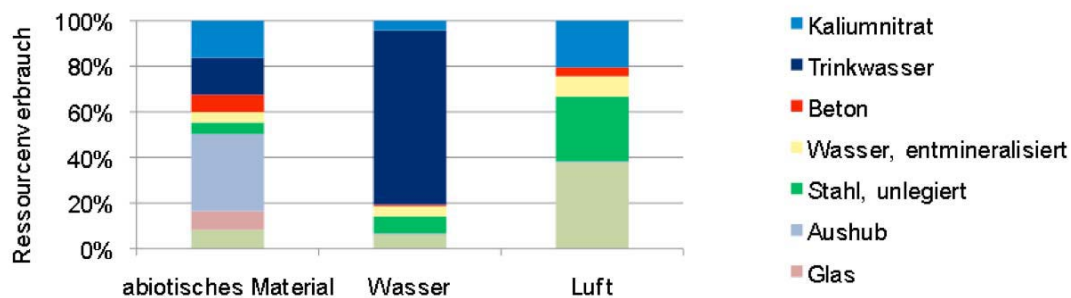
Kategorie		Abiot. (kg/MWh)	Wasser (kg/MWh)	Luft (kg/MWh)	DNI ¹³ (kWh/(m ² *a))
Standort	Marokko	215,7	6.423,0	16,3	2.000
	Tunesien	208,9	6.155,4	16,2	2.100
	Ägypten	200,9	5.839,2	16,3	2.232

Quelle: Samus 2010

Die Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerkes, die den größten abiotischen Ressourcenverbrauch verursachen, zeigt Abb. 16. Kaliumnitrat ist das Wärmespeichermedium, Wasser wird für die Spiegelreinigung benötigt, der Beton und Erdaushub resultieren aus dem Fundament des Solarfeldes, Stahl und Glas hängen vor allem mit den Kollektoren zusammen.

¹³ DNI = Direct normal irradiance (Direktnormalstrahlung)

Abb. 16: Anteile der wichtigsten Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerkes am Standort Marokko in 2025 am Gesamtverbrauch abiotischer Ressourcen



Quelle: Samus 2010

8.3.2 Ressourcenverbrauch des Desertec-Szenarios

Das Desertec-Konzept verursacht insgesamt einen abiotischen Materialverbrauch von ca. 3,2–5,7 Gt (je nach betrachtetem Kraftwerkskonzept) bei einem Energieoutput von ca. 26.950 TWh über den gesamten Lebenszyklus. Trotz der Unterschiede in Trassenlänge und Zusammensetzung (Freileitung / Seekabel) zwischen den drei betrachteten Standorten haben die HGÜ-Leitungen keinen nennenswerten Anteil am Ressourcenverbrauch (geringer als 1 % außer in der Kategorie biotischer Verbrauch auf Grund der Papierisolierung des Seekabels¹⁴).

8.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

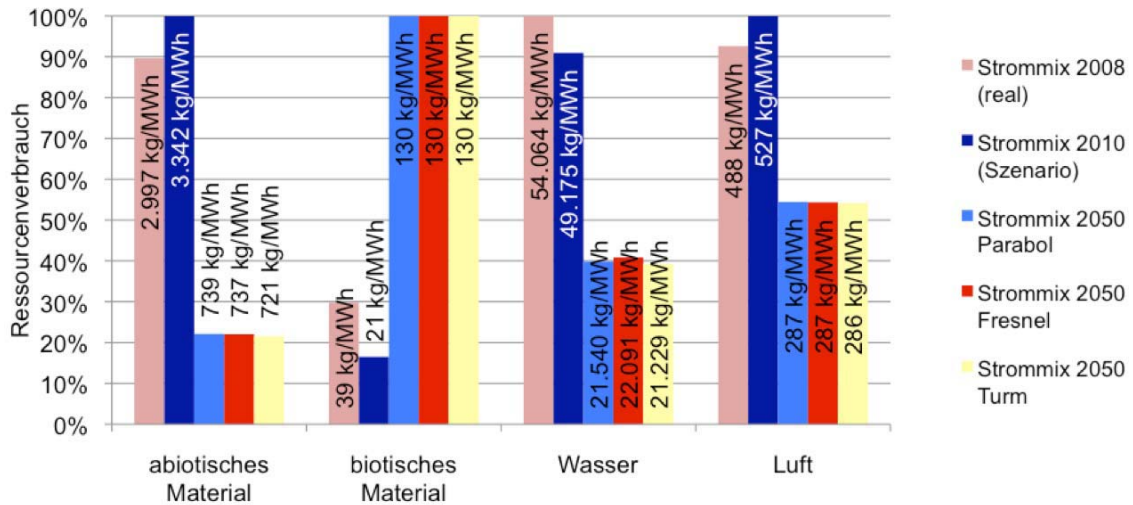
Als Szenario zur Potenzialbestimmung wurde der Strommix in der BRD in 2050 nach DLR 2006 bestimmt. Als Vergleich wurde, um die Annahmen konsistent zu halten, das Szenario über den Strommix in 2010 ebenfalls aus DLR 2006 gewählt.

Der Strommix in der BRD in 2050 verursacht einen abiotischen Ressourcenverbrauch von ca. 430 Mt gegenüber 2.160 Mt in 2010. Der 20 %-ige Anteil von importiertem Solarstrom (Desertec) verursacht davon ca. 14-25 Mt¹⁵, das sind 3-6 %.

¹⁴ Die HGÜ-Trasse von Tunis nach Norditalien (mit einem Seekabel von 373 km Länge) verursacht beispielsweise mehr als 50% des biotischen Verbrauchs eines Parabolrinnenkraftwerkes am Standort Tunesien im Bezugsjahr 2025.

¹⁵ Der Betrag variiert je nach betrachteter Kraftwerksart.

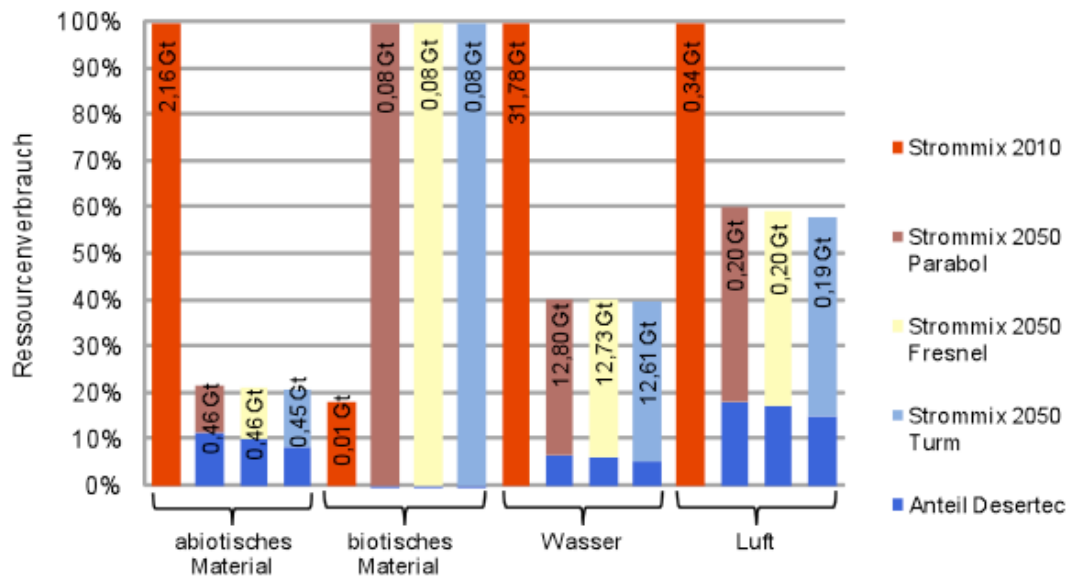
Abb. 17: Ressourcenverbrauch der Strommixe



Quelle: Samus 2010

Bei der Betrachtung der MIPS-Werte (s. Abb. 17: Ressourcenverbrauch der Strommix¹⁶) ist zu beachten, dass neben der Verringerung des Ressourcenverbrauchs durch die überwiegende Nutzung erneuerbarer Energien auch ein verringerter Energieverbrauch beispielsweise durch Maßnahmen der Energieeffizienz einen Einfluss auf diese Zahlen hat: Von 2010 nach 2050 nimmt der Energieverbrauch von 605 TWh/a auf 548 TWh/a ab.

Abb. 18: Hochrechnung auf den Ressourcenverbrauch der BRD



Quelle: Samus 2010

¹⁶ Hier ist zusätzlich zum Vergleich der reale Strommix 2008 nach Wiesen 2010 angegeben.

Abb. 18 zeigt die Ergebnisse der Potenzialanalyse als absoluten Ressourcenverbrauch¹⁷. Deutlich ist zu erkennen, dass ein überwiegend regenerativer Strommix in fast allen MIPS-Kategorien einem hauptsächlich Konventionellem überlegen ist (mit fast 80% Einsparung im abiotischen Verbrauch). Der deutlich höhere Verbrauch biotischer Ressourcen (um etwa das Fünffache) erklärt sich überdies durch den angestrebten Ausbau der Biomasse¹⁸.

8.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Berechnungen haben gezeigt, dass ein überwiegend regenerativer Energiemix mit Desertec-Strom als Regelleistung den Ressourcenverbrauch der Stromerzeugung in der BRD deutlich senken kann (Ausnahme: Biotische Ressourcen, s.o.). Der Vergleich des Ressourceneinsparungspotenzials von rund 1,6 Gt pro Jahr¹⁹ mit dem Total Material Requirement²⁰ (TMR) der BRD nach Acosta 2007 in Höhe von ca. 5,8 Gt pro Jahr für die Stromerzeugung zeigt die enormen Ressourceneffizienzpotenziale, die auf dem Gebiet der Stromerzeugung und -verteilung erschlossen werden können. Die Erosion, die eigentlich Teil des TMR ist, wird bei diesem Vergleich nicht betrachtet, da darüber keine Ergebnisse vorliegen. Eine grobe Abschätzung liefert hier eine Hochrechnung des Bodenverbrauchs einer Biogasanlage nach Wiesen 2010: Der Strommix 2050 bedeutet einen Mehrverbrauch an Bodenbewegung von ca. 7,3 Mt und ist damit für den TMR-Vergleich zu vernachlässigen.

Abgeleitet aus den Materialien/Dienstleistungen mit dem größten Anteil am Ressourcenverbrauch der Kraftwerke ist folgendes bei der Umsetzung des Desertec-Konzeptes zu beachten:

- Standortwahl: Es sollten küstennahe Standorte gewählt werden, um die Wasserversorgung für die Spiegelreinigung zu sichern sowie Infrastruktur zur zusätzlichen Erschließung einzusparen. Bei der Wasserversorgung ist zu klären, ob die solare Desalination zur Trink- und Reinigungswassergewinnung integrierbar ist. Auch eine Wiederverwendung des Reinigungswassers wäre zu untersuchen. Ein küstennaher Standort bietet überdies den Vorteil, die nötigen Transporte zu minimieren, die – wie Standortvariationen zeigen – einen erheblichen Anteil am Ressourcenverbrauch erreichen können.
- Speicher: In dieser Arbeit werden nur Phasenwechselmaterial- und Flüssigsalzspeicher betrachtet. Dies erklärt den hohen Kaliumnitratverbrauch, der auch erheblichen Einfluss auf den gesamten Ressourcenverbrauch hat. Es sind also alternative Wärmespeicherungskonzepte wie beispielsweise Latentwärmespeicher

¹⁷ D.h., die Hochrechnung auf die Stromproduktion und den Stromimport in der BRD.

¹⁸ Zur detaillierteren Betrachtung der Ressourceneffizienzpotenziale von Biomasseverstromung siehe Wiesen (2010).

¹⁹ Dieses setzt sich zusammen aus der Reduktion des abiotischen und dem Wachsen des biotischen Ressourcenverbrauchs.

²⁰ „TMR ist [...] die Summe aus der abiotischen und biotischen Rohstoffe und der Erosion.“ (Ritthoff et al. 2002)

(Beton- bzw. Keramikspeicher) auf ihre Eignung für den Einsatz im Desertec-Konzept sowie ihren Ressourcenverbrauch zu untersuchen.

- Solarturmkraftwerke verursachen den Berechnungen nach den geringsten Ressourcenverbrauch²¹. Bei einem flächendeckenden Einsatz dieser Technologie sollten jedoch die Umweltfolgen der Salzgewinnung – in den meisten Solarturmkraftwerken kommt Flüssigsalz als Wärmeträgermedium zum Einsatz – untersucht werden. Dieser mögliche Reboundeffekt wäre in einer weitergehenden Analyse zu untersuchen.

Nachfolgend wird in Tab. 22 eine zusammenfassende Bewertung des Ressourcenverbrauchs sowie weiterer Kriterien dargestellt.

Tab. 22: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach Rohn et al. (2009) / Auf Basis von Samus (2010)

Kriterium	Desertec	Strommix 2050 mit Desertec-Strom
Ressourceneinsatz	Niedrig; variiert mit CSP-Art und Standort.	sehr niedrig
Ressourceneffizienzpotenzial	Hoch	Sehr hoch in Anbetracht des hohen Ressourcenverbrauchs der Stromerzeugung und -verteilung in der BRD.
Sonstige Umweltauswirkungen	Unklare Auswirkungen auf das Ökosystem Wüste; Umweltauswirkungen durch Übertragungsleitungen nicht ausreichend erforscht; hoher Wasserverbrauch zur Reinigung der Spiegel ungelöst.	Mögliche negative Folgen durch Ausbau der Biomasseverstromung (z.B. Einschränkung der Biodiversität durch Energiepflanzenmonokulturen wie Raps).
Realisierbarkeit	Einzelne Aspekte sind technisch noch nicht geklärt (z.B. Fundament in der Wüste, Auswirkung von Staub und Sand auf die Technik), sollten aber lösbar sein. Problematisch sind vor allem die Produktionskapazitäten (die bisher kaum ausgebaut sind).	Technisch ist der angestrebte Strommix komplett realisierbar. Probleme könnten jedoch mangelnde Produktionskapazitäten und (ökonomisch und verwaltungsrechtlich) knapper werdende Standorte bereiten.
Wirtschaftliche Bedeutung	Die wirtschaftliche Bedeutung ist abhängig von den politischen Entscheidungen, wo und wie die Anlagen produziert werden, wie der Betrieb und die Wartung organisiert werden (hinsichtlich Ausbildung vor Ort gegenüber „importierten“ Fachkräften) und wie die Lieferverträge ausgehandelt werden.	Die Elektrizitätsversorgung in der BRD hatte im Jahr 2007 einen Anteil von 8,7% ²² am Bruttoinlandsprodukt (vgl. destatis 2009 und destatis 2010).
Kommunizierbarkeit	Prinzipiell hoch, wenn die Standortländer in den Planungsprozess integriert werden.	Die Kommunizierbarkeit regenerativer Energieträger ist generell hoch.
Übertragbarkeit	Grundsätzlich lassen sich die Ergebnisse auch auf andere Wüstenregionen/Regionen mit hoher Solareinstrahlung übertragen.	Für andere europäische Länder sind ähnlich Ergebnisse zu erwarten (evtl. Ausnahmen: Frankreich, Schweiz, Österreich, Norwegen ²³)

²¹ In anderen Studien werden ähnliche Ergebnisse erzielt (vgl. Viebahn et al. 2008).

²² Berechnet aus: Statistisches Bundesamt (2010): Unternehmen, Beschäftigte, Umsatz (Energie- und Wasserversorgung) und Bruttoinlandsprodukt und Bruttowertschöpfung in jeweiligen Preisen und preisbereinigt.

²³ Frankreich auf Grund des hohen Anteils von Kernkraftwerken am Strommix; Norwegen, Österreich, Schweiz auf Grund des hohen Wasserkraftanteils

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass ein regenerativer Energiemix ein hohes Ressourceneffizienzpotenzial besitzt. Desertec-Strom kann hierzu als ressourceneffizienter Lieferant von Regelleistung einen wichtigen Beitrag leisten. Die Technologieoption Solarturm besitzt dabei nach den Ergebnissen dieser Arbeit innerhalb der solarthermischen Kraftwerke die höchste Ressourceneffizienz.

8.6 Quellenverzeichnis

- Acosta-Fernández, J. (2007): Identifikation prioritärer Handlungsfelder für die Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität in Deutschland. Wuppertal Institut, Wuppertal.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) (2008): Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien - Leitstudie 2008. BMU, Berlin.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) (Hrsg.) (2006): Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power - TRANS-CSP. DLR, Stuttgart.
- DLR (Hrsg.) (2007): Concentrating Solar Power for Seawater Desalination - AQUA-CSP. DLR, Stuttgart.
- Hendriks, C.; Geurder, N.; Viebahn, P.; Steinsiek, F.; Spies, J. (2004): Solar Power from Space: European Strategy in the Light of Sustainable Development – Phase 1: Earth and Space based power generation systems, Ecofys bv, Utrecht.
- May, N.: Ökobilanz eines Solarstromtransfers von Nordafrika nach Europa; TU Braunschweig, Braunschweig, 2005.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Identifikation von Technologien, Produkten und Strategien mit hohem Ressourceneffizienzpotenzial – Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses – Meilensteinbericht aus dem Arbeitspaket 1 des Ma-Ress-Projekts. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Samus, T. (2010): Ressourceneffiziente Energieerzeugung: Potenziale von Desertec-Strom. Universität Kassel, Kassel.
- Trieb, F.; O'Sullivan, M.; Pregger, T.; Schillings, C.; Krewitt, W. (2009): Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe: Potential, Infrastructure and Cost. DLR, Stuttgart.
- Viebahn, P. (2004): SOKRATES: Solarthermische Kraftwerkstechnologie für den Schutz des Erdklimas: AP 2.2: Technologievergleich: Ökobilanzen von SEGS-, FRESNEL- und DSG-Kollektoren. DLR, Stuttgart.
- Viebahn, P.; Kronshage, S.; Trieb, F.; Lechon, Y. (2008): NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability: Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants. DLR, Stuttgart, 2008.
- Wiesen, K. (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der regenerativen Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland. Projektbericht, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse, Januar.

9 Ressourceneffiziente Energieerzeugung: Bereich Photovoltaik

Anna Cholewa (RWTH Aachen, Studiengang Entsorgungswesen)

Eberhard Büttgen (RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft)

9.1 Einleitung

Die Sonnenenergie bietet das größte technisch nutzbare Potenzial aller erneuerbaren Energien. Neben der Nutzwärme stellt die Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen (PV) auch in Deutschland in Zukunft einen bedeutenden Teil des regenerativen Energiemixes dar (Energiemix 2030 nach Wiesen 2010). Um diese Ziele zu erreichen müssen weitere Innovationen auf die bereits erfolgreiche Entwicklung dieser Technologie folgen. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung müssen sowohl die Energie- als auch die Ressourceneffizienz der Photovoltaik-Module gesteigert werden. Welcher PV-Technologie die höchsten Marktchancen zugewiesen werden und wie sich deren Ressourceneffizienz im Vergleich mit alternativen Verfahren darstellt, wird im Rahmen dieser Arbeit analysiert und bewertet.

9.2 Vorgehensweise

Mit Hilfe des MIPS-Konzeptes wurden zwei unterschiedliche PV-Systeme hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauchs analysiert und das Ressourceneffizienzpotenzial im Vergleich beider Systeme quantifiziert.

9.2.1 Untersuchte Produkte

Untersucht wurden in dieser Arbeit zwei PV-Lamine, die das Ausgangsmaterial für die Produktion von PV-Modulen bilden. Neben einem amorphem Silicium-Laminat (a-Si) für die Herstellung von Dünnschichtsystemen, wurde ein multikristallines Silicium-Laminat für Dickschichtsysteme (mc-Si) untersucht und hinsichtlich der Lebensdauer und Effizienz (Wirkungsgrad) variiert. Mono- und multikristalline PV-Zellen resp. -lamine zeichnen sich zwar durch einen hohen Wirkungsgrad von 13-18% aus, sind aber in der Herstellung material- und kostenintensiv und in der Verwendung fast ausschließlich auf Installationsflächen mit einer Neigung von 30 Grad und Südausrichtung angewiesen. Amorphe Dünnschichtzellen auf Silizium-Basis haben einen deutlich geringeren Wirkungsgrad von derzeit rund 8 %, sind aber auf Grund der materialsparsamen und effizienteren Herstellung ungleich dünner als Dickschichtsysteme und preiswerter. Zudem bieten sie den Vorteil, auch bei geringer Neigung der Module bis zu 10 Grad und einer von Süden abweichenden Ausrichtung, effektiv Strom zu produzieren. Durch die Biegsamkeit der Lamine, die geringe Temperaturanfälligkeit und die Flexibilität in den Modulgrößen eröffnen sich

Installationsmöglichkeiten wie Fassaden, Flachdächer, Lärmschutzwände, Säulen, Autodächer, etc., die den Dickschichtmodulen verwährt bleiben.

Tab. 23: Eckdaten der untersuchten PV-Lamine

	mc-Si-Laminat, Status Quo	mc-Si-Laminat, optimiert	a-Si-Laminat, Status quo
Technologie	Dickschicht	Dickschicht	Dünnschicht
Silicium	multikristallin	multikristallin	amorph
Wirkungsgrad Labor	19,8 %	19,8 %	13 %
Wirkungsgrad Produktion	13 %	15,5 %	8 %
Flächenbedarf für 1 kWp	9 m ²	6 m ²	14 m ²
Schichtdicke	250-300 µm	250-300 µm	3-10 µm
Lebensdauer	20 Jahre	30 Jahre	20 Jahre

Quelle: Nach Kaltschmitt 2006

9.2.2 Definition der Service-Einheit

Der Materialinput (MI) in kg wird auf die MWh_{el} bezogen, so dass als Service-Einheit kg/MWh in der Arbeit ausgewiesen werden.

9.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Es wurden die Massen und Basismaterialien sowie die Energieaufwendungen für die Produktion der PV-Lamine vom Quarzsand bis zum Laminat erfasst. Die Systemgrenze wurde so gewählt, dass die Weiterverarbeitung der Lamine (Modulherstellung), die Installation und Wartung der Module, die Anlageninfrastruktur und die Entsorgung der Module nicht berücksichtigt wurden. Es wird angenommen, dass beide Systeme in der Installation, der Netzanbindung und Wartung vergleichbar sind. Zur Recyclingfähigkeit resp. Entsorgung der Systeme liegen derzeit keine aussagekräftigen Ergebnisse und Untersuchungen vor.

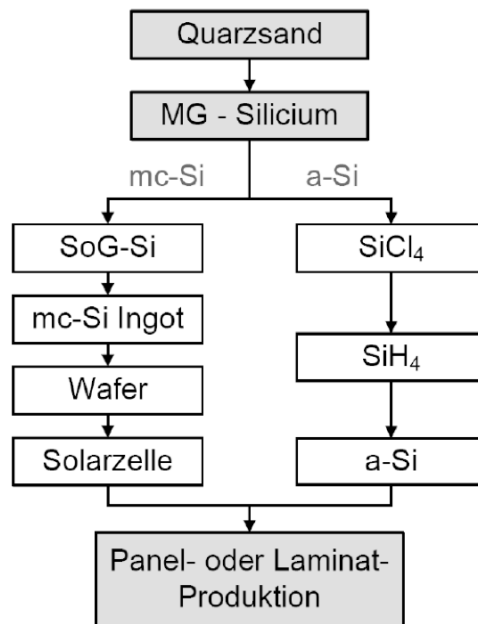
Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Die Lebensdauer der Module wurde grundsätzlich auf 20a festgelegt, bei der optimierten Version des mc-Si-Laminats wurde diese auf 30a angehoben.
- Die Wirkungsgrade (WG) der Module wurden auf 13 % für das mc-Si-Laminat und 8 % für das a-Si-Laminat festgelegt, anschließend wurde der Wirkungsgrad des optimierten mc-Si-Laminats mit 15,5 % angenommen.
- Der Materialverbrauch für optimiertes mc-Si-Laminat ändert sich nicht durch optimierte Produktionsverhältnisse und Qualitätssicherung.
- Die Wirkungsgrade werden mit ihrem Maximalwert angenommen, in Realität geben Hersteller eine Leistungsgarantie von 20 bis 30 Jahren, die gewährleistet, dass die Leistung zu diesem Zeitpunkt noch 80 % der Nennleistung beträgt.
- Die durchschnittliche jährliche Sonneneinstrahlung von 1.000 kWh/m².

9.2.4 Datenerfassung

Die Prozessdaten für die Berechnung der MIPS Werte wurden Jungbluth et al. (2009) sowie der Probas Datenbank entnommen. Die Bilanzierung wurde nach den spezifischen Halbzeugen (s. Abb. 19) getrennt und beinhaltet die Energiebereitstellung für den jeweiligen Produktionsprozess und den Transport der Ausgangsmaterialien per LKW, Schiene und Schiff.

Abb. 19: Herstellungsprozess des mc-Si- und des a-Si- Laminats



Quelle: Cholewa 2010

9.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

9.3.1 Ressourcenverbrauch des mc-Si-Laminat

Im Vergleich der beiden Module zeigt sich eine deutlich höhere Ressourceninanspruchnahme beim Dickschichtmodul. Die Werte für biotische Materialien und Boden sind vernachlässigbar gering. Der abiotische Materialverbrauch für einen m^2 mc-Si-Laminat beträgt etwa 55 kg.

Beim mc-Si-Laminat (Status Quo) ist der Anteil der Produktionsenergie an den Gesamtverbräuchen der größte Posten mit 50 % bei den abiotischen Materialien, 67 % bei Wasser und 50 % bei Luft..

Ebenso hohe Anteile am Ressourcenverbrauch haben die bei den unterschiedlichen Prozessstufen verwendeten Edelmetalle Silber und Kupfer, als auch die sonstigen Metalle wie Eisen, Zink und Aluminium.

Bei der Sensitivitätsanalyse wurde die Lebensdauer auf 30 Jahre und der Wirkungsgrad auf 15,5 % heraufgesetzt. Die Ressourcenverbräuche liegen dadurch über alle Kategorien um ca. 40 % niedriger.

9.3.2 Ressourcenverbrauch des a-Si-Laminats

Der abiotische Materialverbrauch bei der Produktion eines m^2 a-si-Laminat beträgt 14kg. Der auch hier hohe Wasserverbrauch von $120l/m^2$ Laminat ($320 l/m^2$ bei mc-Si) ist auf den hohen Strombedarf der Produktion zurückzuführen.

Der Energieanteil an den Ressourcenverbräuchen beträgt bei den abiotischen Materialien 46 %, bei Wasser 76 % und bei Luft 39 %.

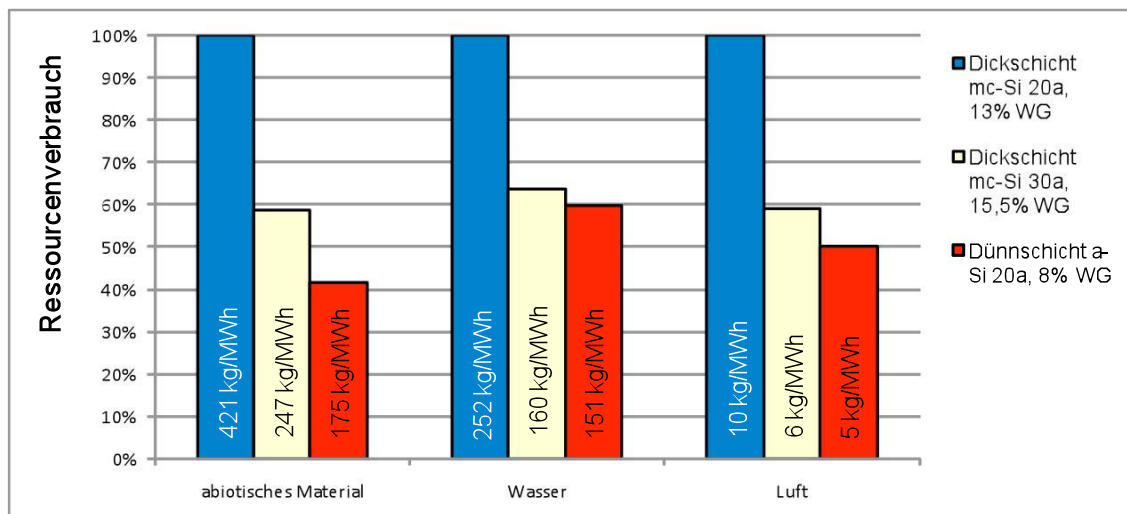
Der Ressourcenverbrauch der a-Si-Lamine im Vergleich zu den mc-Si-Laminaten (Status Quo) beträgt bei den abiotischen Materialien 42 % (58 % Einsparpotenzial - EP), bei Wasser 60 % (40 % EP) und Luft 50 % (50 % EP). Die Anhebung der Effizienz der mc-Si-Lamine (optimiert) verringert das Einsparpotenzial auf 30% (abiotische Materialien), 5% (Wasser) und 16% (Luft).

9.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Im Rahmen dieser Potenzialanalyse wurde die Annahme getroffen, dass sich bis zum Jahr 2030 eine der beiden analysierten Technologien auf dem Markt durchgesetzt hat. Resultat der Analyse ist ein erheblicher Materialverbrauch der multikristallinen Dickschichtmodule, der einem enormen Flächenverbrauch der Dünnschichtmodule gegenübersteht.

Der Berechnung liegen die Prognosen des BMU 2009 (Nitsch) zum Energiemix 2030 zu Grunde, die von einer Gesamtproduktion von PV-Strom in Deutschland von 25,9 TWh/a und einem Anteil von 9,5 % des Erneuerbare Energien Anteils und 4,8 % des Brutto-Stromverbrauchs ausgehen.

Abb. 20: Vergleich des Ressourcenverbrauchs der untersuchten Varianten je Serviceeinheit



Quelle: Cholewa 2010

Tab. 24: Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial

Szenario	abiotisches Material	Wasser	Luft	Flächenbedarf
mc-Si (20a, 13%)	217 Mt	1306 Mt	52 Mt	19.923 ha
mc-Si (30a, 15,5%)	183 Mt	1096 Mt	44 Mt	16.710 ha
Einsparpotenzial	- 34 Mt	- 210 Mt	- 8 Mt	- 3.213 ha
a-Si (20a, 8%)	91 Mt	783 Mt	26 Mt	32.375 ha
Einsparpotenzial	- 126 Mt	- 523 Mt	- 26 Mt	+ 12.452 ha

Quelle: Cholewa 2010

Unter der Annahme, dass im Jahr 2030 für die Erzeugung des Solarstroms in Deutschland ausschließlich S-Si-Module verwendet würden, kann die Einsparung abiotischer Ressourcen gegenüber der Verwendung von mc-Si-Modulen mit 126 Mt, gegenüber der Verwendung der optimierten mc-Si-Module mit 92 Mt (-126 Mt +(-) 34 Mt) beziffert werden. Bei Wasser sind dies 523 Mt bzw. 313 Mt (-523 Mt +(-) 210 Mt).

Der erhöhte Flächenbedarf bei den a-Si-Modulen von 12.452 ha bzw. 15.665 ha (12.452 ha +(-) 3.213 ha) ergibt sich allein durch den geringeren Wirkungsgrad. Die zur Installation der Module benötigten Flächen könnten nach aktuellen Prognosen (Lödl et al. 2010) alleine durch Dachflächen abgedeckt werden.

9.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der Ressourcenverbrauch des mc-Si-Laminats erheblich höher ist als der des a-Si-Laminats. Besonders der Wasserverbrauch des multikristallinen Laminats sticht hier heraus, dieser ist gut 60 % höher als der des amorphen Laminats. Auch bei dem optimierten mc-Si-Laminat liegt der Verbrauch in allen Ressourcenkategorien über dem des a-Si-Laminats. Der Flächenbedarf dagegen ist für das mc-Si-Laminat deutlich geringer. Besonders großen Einfluss auf die Ressourcenverbräuche beider Module hat der Energieverbrauch. Bei der Betrachtung von Recyclingwegen gibt es große Unterschiede zwischen den beiden Modulen. Ein Recycling ist für mc-Si Module sehr erstrebenswert, da so der Ressourcen- und der Energiebedarf deutlich gesenkt werden könnten, wohingegen für a-Si Module kein weiterer Untersuchungsbedarf von Recyclingmöglichkeiten gesehen wird, da der Siliciumanteil zu gering ist. Hier sind primär die Glas- und Metallanteile der Module wirtschaftlich interessant.

Tab. 25: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	mc-Si Modul	a-Si Modul
Ressourceneinsatz	Sehr niedrig	Sehr niedrig
Ressourceneffizienzpotenzial	Sehr hoch, Steigerung durch Recycling möglich.	Hoch, Steigerung durch höhere Wirkungsgrade und längere Lebensdauer.
Sonstige Umweltauswirkungen	Freiflächenanlagen: große Flächeninanspruchnahme führt zu Versiegelung und Bodenerosion durch konzentrierten Wasserabfluss. Landschaftsbild und Vegetation werden verändert, visuelle Beeinträchtigung, Lichtreflexionen, desweiteren kommt es zu Zerschneidung von Landschaften. Dachanlagen: visuelle Beeinträchtigung möglich, Lichtreflexionen.	
Realisierbarkeit	Unproblematisch, sofern genügend große Flächen zur Verfügung stehen. Beide Technologien sind bereits erprobt.	
Wirtschaftliche Bedeutung	Hoch, da Wertschöpfungskette überwiegend im Inland vollzogen werden kann. Die Solarindustrie ist eine der wachstumsstärksten Branchen in Deutschland.	
Kommunizierbarkeit	Unproblematisch, da Solarenergie ein „grünes“ Image hat, kritisch nur die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes bei Freiflächenanlagen.	
Übertragbarkeit	Die Untersuchungsergebnisse lassen sich auf polykristalline Lamine unterschiedlicher Hersteller übertragen. Für monokristalline Lamine ist dies aufgrund des divergenten Herstellungsprozesses nicht möglich.	Die Ergebnisse sind auf amorphe Lamine übertragbar welche in dem gleichen Verfahren (United Solar) hergestellt werden, jedoch nicht auf andere Dünnschichtlamine, da die Herstellungsverfahren unterschiedlich sind.

Quelle: Cholewa 2010

Der Ressourcenbedarf von polykristallinen Solarlaminaten könnte durch ein effektives Recycling der Wafer²⁴ erheblich gesenkt werden. Hier stecken große Potenziale, da auch der Energieverbrauch über die gesamte Lebensdauer eines Wafers so deutlich gesenkt werden könnte. Durch die so erzielte Einsparung sowohl von Ressourcen als auch von Energie können auch die Produktionskosten gesenkt werden, was besonders in Hinblick auf die globale Wettbewerbsfähigkeit einen signifikanten Einflussfaktor darstellt.

Zusammenfassend können aus den Ergebnissen der Studie folgende Schlüsse gezogen werden: die Steigerung der Ressourceneffizienz von Solarlaminaten kann vor allem durch eine Verlängerung der Lebensdauer sowie durch höhere Wirkungsgrade

²⁴ Aus dem polykristallinen Reinst-Silizium in Block oder Zylinderform werden Scheiben (Wafer) geschnitten, die anschließend durch Dotierung und Aufbringung einer Spannungsabgreiferstruktur zu PV-Zellen verarbeitet werden.

erreicht werden. Was in der Arbeit exemplarisch für Dickschichtmodule festgestellt wurde, kann grundsätzlich auch auf die Dünnschichtmodule übertragen werden. Eine Verlängerung der Lebensdauer und der Wirkungsgrade könnten die Ressourceneffizienz gegenüber den Dickschichtsystemen weiter erhöhen.

Neben dem Recycling ist besonders die Entwicklung von ressourceneffizienten Technologien zur Stromspeicherung ein entscheidender Faktor, um die regenerative Stromerzeugung durch Photovoltaik dauerhaft und insgesamt ressourceneffizient zu gestalten. Stromspeicher sind insoweit in der Gesamtbetrachtung des Ressourcenverbrauchs regenerativer Energien zu berücksichtigen, da sie unabdingbar sein werden im Rahmen der effizienten Integration dieser „Stromquellen“ in das Stromnetz. Die Unstetigkeit der Verfügbarkeit von PV-Strom und das beabsichtigte Ziel der Bundesregierung, den Eigenverbrauch von PV-Strom zu fördern, bedingen eine Form der Zwischenspeicherung, bspw. durch Li-Ionen-Akkus, Umwandlung in Wasserstoff oder Methan oder Überführung in Wärme, die zusätzliche Ressourcen in Anspruch nehmen werden.

9.6 Quellenverzeichnis

- Cholewa, A. (2010): Ressourceneffiziente Energieerzeugung: Bereich Photovoltaik.
- Jungbluth, N.; Stucki, M.; Fischknecht, R. (2009): Life Cycle Inventories of Energy Systems, Part XII: Photovoltaics.
- Nitsch, J. (2009): „Leitszenario 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung“; Untersuchung im Auftrag des BMU.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.

10 Ressourceneffizienzkriterien im Design am Beispiel Mobiltelefon

Verena Simon (Universität Duisburg-Essen, Industriedesign)

Prof. Anke Bernotat (Folkwang Universität, Industriedesign)

Michael Lettenmeier (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

10.1 Einleitung

Elektronikprodukte sind bezüglich ihres Ressourcenverbrauchs eine relevante Produktgruppe. Zum Einen sind sie relativ ressourcenintensiv, u.a. aufgrund der seltenen Metalle, die in ihnen verwendet werden. Zum Anderen ist ihre Nutzungsdauer oft relativ kurz und sie werden in hohen bzw. steigenden Stückzahlen verkauft. Desweiteren fallen in Deutschland jährlich große Mengen an Elektronikschrott an. Ein bedeutender Teil dessen entfällt auf den Mobilfunksektor. Bisher wird in Deutschland allerdings nur ein Bruchteil der Mobiltelefone ordnungsgemäß entsorgt und recycelt (Stichler 2008). Bei einer Marktdurchdringung in Deutschland in 2008 von über 100% mit über 100 Millionen Mobilfunknutzern kommt dem Handy eine große wirtschaftliche Bedeutung zu.

Ziel der Arbeit war es, ein Produkt nach Kriterien, die zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen, zu gestalten (Simon 2010). Hierzu wurde das Produkt Mobiltelefon ausgewählt, da es gesellschaftlich besonders relevant ist und seine Produktion, Zusammensetzung und Nutzung Anlass geben über Ressourceneffizienzpotenziale nachzudenken.

10.2 Vorgehensweise

Zunächst wurden verschiedene Konzeptansätze entwickelt, wie ein Gerät zur mobilen Kommunikation so gestaltet werden kann, dass die Ressourcen effizienter verwendet werden können. Anschließend wurde der Konzeptansatz der reduzierten Handy-Variante ausgearbeitet und gestaltet (Simon 2010). Um die Ressourceneffizienzpotenziale zu quantifizieren, wurde exemplarisch eine Analyse auf Basis des MIPS-Konzepts für die verschiedenen Konzeptansätze durchgeführt.

10.2.1 Untersuchte Produkte

Untersucht wurden in der Arbeit ein Standard-Handy, eine reduzierte Handy-Variante, ein Smartphone, das andere Geräte ersetzt, ein Handy, welches wesentlich länger genutzt wird sowie ein Handy, das seine Nutzungsenergie aus der Umgebung schöpft.

Tab. 26: Eckdaten der untersuchten Konzepte jeweils bezogen auf das Standard-Handy

Standard-Handy	Reduziertes Handy	Smartphone	Längere Nutzungsdauer	Null-Energiehandy
Gewicht 100 g, durchschnittliche Nutzungsdauer zwei Jahre, Berechnungen inkl. Stromverbrauch und Ladegerät	Gewicht 50 g, kein Ladegerät mehr	Ersetzt Telefon, Kamera, Videokamera, MP3-Player, Kalender, Navi, Uhr, USB-Stick, Radio/Wecker, Annahme: dreifacher Ressourcenverbrauch	Annahme: doppelte Nutzungsdauer	Ohne Ladegerät, ohne Stromverbrauch

10.2.2 Definition der Service-Einheit

Als Service-Einheit wird die Nutzung eines Mobilfunkgerätes über ein Jahr definiert. Der Ressourcenverbrauch wird in Kilogramm pro Jahr angegeben.

10.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Die Massen und Basismaterialien wurden einer italienischen Studie zum Ressourcenverbrauch von Handys gewonnen (Federico et al. 2001), der Aufwand an Nutzungsenergie bezieht sich auf ein Jahr (Abele 2008).

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Das Durchschnittshandy wiegt 100 g und unterliegt einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von zwei Jahren.
- Für die Materialintensität des Energieverbrauchs wurde der deutsche Strommix zugrunde gelegt.
- Transporte sowie Infrastruktur für Herstellung, Vertrieb, Reparaturen und Netz wurden nicht berücksichtigt. Auch der Energieverbrauch zur Montage des Mobiltelefons ist nicht einberechnet.
- Für das reduzierte Handy wurde mit der Hälfte des Gewichts bei gleichmäßiger Reduzierung der Inhaltsstoffe und zusätzlich mit der halbierten Materialintensität gerechnet, welche sich beispielsweise durch die Nutzung recycelter Rohstoffe ergeben könnte.
- Die Nutzungsdauer für das länger genutzte Handy wurde bei vier Jahren angesetzt. Es wurde angenommen, dass die verlängerte Nutzung zumindest keinen höheren Ressourcenverbrauch für Transporte und Infrastruktur verursacht als bei der aufeinanderfolgenden Nutzung von zwei Durchschnittshandys.
- Für das Smartphone wurde der dreifache Materialinput angenommen. Für die Geräte, die das Smartphone ersetzt (Telefon, Kamera, Videokamera, MP3-Player, Kalender, Navi, Uhr, USB-Stick, Radio/Wecker) wurden Materialintensitäten und Nutzungsdauer anhand von Daten aus dem Projekt FIN-MIPS Households (vgl. Kotakorpi 2008) und der Datenbank des Wuppertal Instituts ermittelt.

10.2.4 Datenerfassung

Daten zur Materialzusammensetzung von Mobiltelefonen sind im Allgemeinen nur sehr vereinzelt und auf grober Ebene verfügbar. Die jeweiligen Handy-Hersteller veröffentlichen im Allgemeinen keine Daten zur Materialzusammensetzung oder Materialintensität der Telefone. Daher wurden die Daten über Recyclingfirmen und Literatur (Huisman 2004; Federico et al. 2001) ermittelt. Für die Bestimmung der Materialien wurden neben Herstellerangaben auch Literaturwerte und Abschätzungen herangezogen.

10.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus den ermittelten Materialien und Energiemengen wurde nach dem MIPS-Konzept der Ressourcenverbrauch für das jeweilige Handy-Konzept berechnet. Bei der Berechnung der Handy-Werte wurden grundsätzlich die biotischen Faktoren und Bodenfaktoren weggelassen, da sie keine Relevanz besitzen.

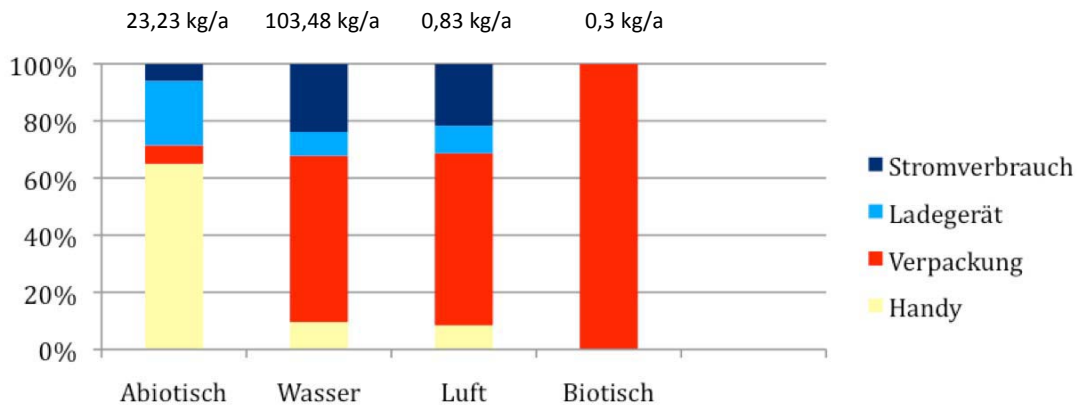
10.3.1 Ressourcenverbrauch des Standardhandys

Bei einer Nutzungsdauer von einem Jahr verursacht ein Standardhandy insgesamt einen abiotischen Materialverbrauch von 23,23 kg/a, der Materialverbrauch in der Kategorie „Wasser“ beträgt 103,48 kg/a und in der Kategorie „Luft“ 0,83 kg/a (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**) Diese Werte setzen sich aus dem Handy, seinem Stromverbrauch, dem Ladegerät sowie der Verpackung zusammen. Bei der Verpackung kommen die Werte für den biotischen Ressourcenverbrauch mit 0,3 kg/a hinzu.

Am abiotischen Materialaufwand hat das Handy mit 15,1 kg/a den größten Anteil. Es setzt sich zusammen aus etwa 60 % an verschiedenen Kunststoffen, 10% an Glassubstraten und ca. 30% verschiedenen Metallen, die mitunter zu Anteilen unter 0,5 % enthalten sind. Dazu zählen zum Beispiel Gold, Zink, Silber, Chrom, Cadmium und viele weitere (Blass 2006).

In den Kategorien Wasser und Luft verursacht bei Verwendung der vorhandenen Daten die Verpackung mit jeweils mehr als 50% den größten anteiligen Ressourcenverbrauch. Biotische Ressourcen werden ausschließlich durch die Verpackung verbraucht.

Abb. 21: Ressourcenverbrauch des Standardhandys.



Quelle: Eigene Berechnungen

10.3.2 Ressourcenverbrauch der reduzierten Handy-Variante

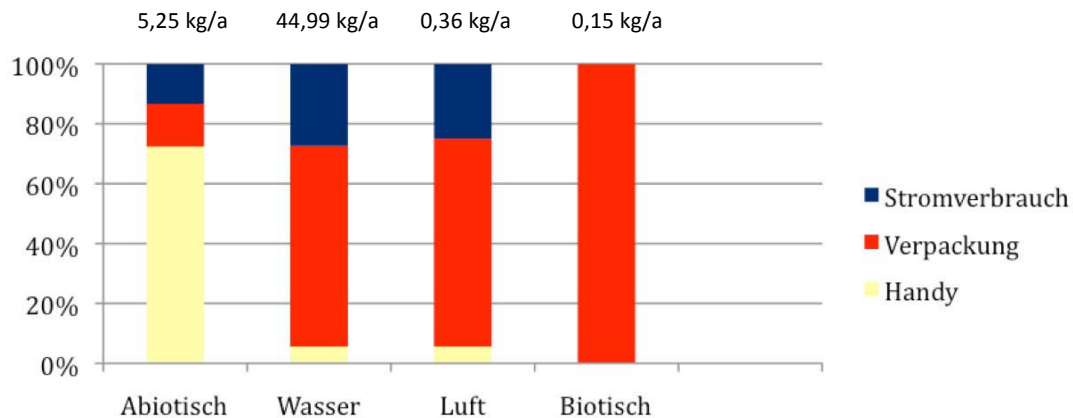
Unter der Annahme, dass eine reduzierte Handy-Variante nur noch 50 g wiegt und die Inhaltsstoffe gleichmäßig reduziert sind, beträgt der Materialverbrauch „abiotisch“ nur noch 5,3 kg/a, der Verbrauch an Wasser nur noch 45 kg/a und der Verbrauch an Luft nur noch 0,4 kg/a (Abb. 22). Würde man zusätzlich mit der Halbierung der Materialintensität rechnen, welche sich beispielsweise durch die Nutzung recycelter Rohstoffe ergeben könnte, so würde der Materialverbrauch in der Kategorie „abiotisch“ 3,8 kg/a, in der Kategorie „Wasser“ 2,5 kg/a und in der Kategorie „Luft“ 0,2 kg/a betragen.

Bei diesem Handy-Konzept wird das Ladegerät nicht mehr automatisch mitverkauft, sodass die darauf entfallenden Ressourcen gänzlich eingespart werden.

Für den Stromverbrauch wurde ebenfalls der halbierte Wert angesetzt, da bei weniger enthaltenen Funktionen und einer Ausrichtung der Nutzung auf die Kernfunktionen Telefonieren und Schreiben von Kurznachrichten die Intensität und die Häufigkeit der Nutzung wesentlich reduziert sein dürfte. Insofern nimmt hier der Ressourcenverbrauch für Strom abiotisch nur noch 0,7 kg/a ein, für Wasser 12,34 kg/a und für Luft noch 0,09 kg/a. Bei den Faktoren Wasser und Luft liegt der Anteil des Stromverbrauchs somit bei über 20 %.

Die Verpackung wurde ebenfalls nur mit der Hälfte des Ressourcenverbrauchs berechnet, da davon ausgegangen wird, dass ein ressourceneffizientes Handy auch mit einer weniger aufwändigen Verpackung verkauft wird.

Abb. 22: Ressourcenverbrauch der reduzierten Handy-Variante



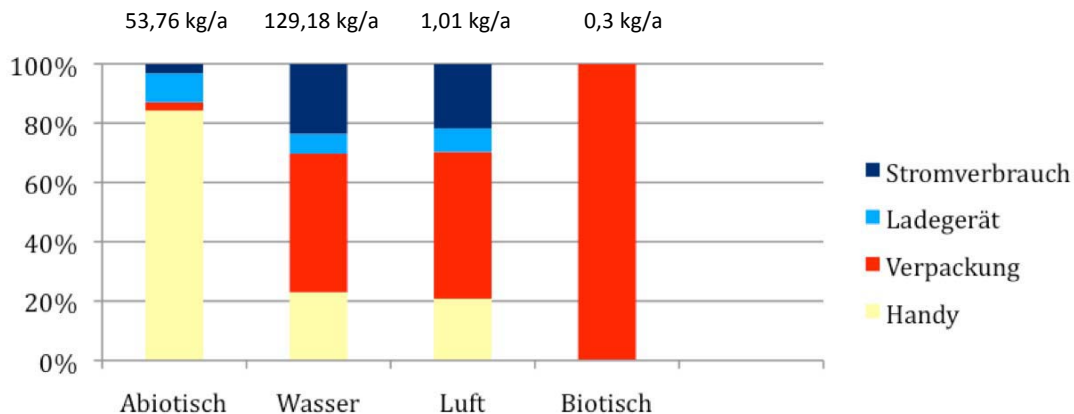
Quelle: Eigene Berechnungen

10.3.3 Ressourcenverbrauch des Smartphones

Hierfür wurde zunächst der dreifache Ressourcenverbrauch eines Standard-Handys veranschlagt, sodass sich hier Werte für den abiotischen Verbrauch von 45,3 kg/a, für Wasser 29,7 kg/a und für Luft 0,21 kg/a ergeben. Auch der Stromverbrauch wird hier aufgrund der Funktionsvielfalt höher eingeschätzt. Der Ressourcenverbrauch beträgt daher abiotisch 1,73 kg/a, bei Wasser 30,57 kg/a und bei Luft 0,22 kg/a. Damit liegt der Anteil bei knapp 4 % für abiotisches Material, bei jeweils etwas über 20 % für Wasser und Luft. Insgesamt beträgt der Ressourcenverbrauch des Smartphones somit 53,8 kg/a abiotisch, 129,2 kg/a an Wasser, 1 kg/a an Luft und 0,3 kg/a biotisch (s. Abb. 23).

Das Konzept des erweiterten Smartphones ist darauf ausgelegt, andere Geräte komplett zu ersetzen. In diesem Szenario werden Telefon, Kamera, Videokamera, MP3-Player, Kalender, Navigationsgerät, Uhr, USB-Stick und Radiowecker eingespart. Wenn diese Geräte aufgrund des Smartphones tatsächlich nicht angeschafft, also auch nicht hergestellt werden, ergeben sich nur noch 15,5 kg/a für abiotisches und 0,3 kg/a für biotisches Material. Für Wasser und Luft ergäben sich bei der Vermeidung aller Geräte sogar Gesamteinsparungen von 153,3 bzw. 3,5 kg/a. Somit lägen die Ressourceneinsparungen pro Jahr bei 71,2 % für abiotisches Material, bei 218,7 % für Wasser und bei 447,5 % für Luft.

Abb. 23: Ressourcenverbrauch eines Smartphones ohne Abzug der Einsparungen durch andere Geräte



Quelle: Eigene Berechnungen

10.3.4 Ressourcenverbrauch des länger genutzten Handys

Für den Ressourcenverbrauch ergeben sich bei einem länger genutzten Handy die gleichen Werte wie beim Standard-Handy. Wichtig sind hier jedoch die Einsparungen, die sich durch die längere Nutzungsdauer ergeben. Geht man von einer Nutzungsdauer von vier Jahren aus, also der doppelten Nutzungszeit gegenüber dem momentanen Durchschnitt, führt dies insgesamt zu einem Ressourcenverbrauch von 13 kg/a an abiotischem Material, 76 kg/a an Wasser, 0,6 kg/a an Luft und 0,15 kg/a an biotischem Material. Die Einsparungen betragen 32,7 % bei abiotischem Material, 4,8 % bei Wasser und 4,8 % bei Luft.

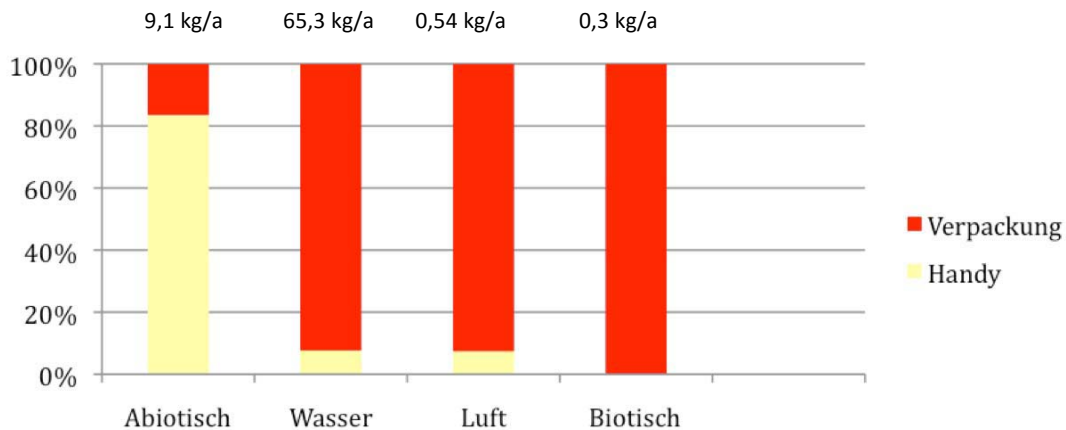
Bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren beträgt der Ressourcenverbrauch 11,23 kg/a an abiotischem Material, 95,58 kg/a an Wasser, 0,77 kg/a an Luft und 0,3 kg/a an biotischem Material. Die Einsparungen liegen bei 51,7 % abiotisch, bei 7,6 % bei Wasser und bei 7,2 % bei Luft.

10.3.5 Ressourcenverbrauch des Null-Energie-Handys

Beim Null-Energie-Handy ist davon auszugehen, dass es keinen Netzstrom und damit auch kein Ladegerät benötigt. Es bezieht seine Energie aus der Umgebung. Ansätze für diese Technologie gibt es bereits. Sie ist jedoch noch nicht ausreichend ausgereift, als dass ein solches Handy-Konzept zum jetzigen Zeitpunkt umsetzbar wäre.

Bei diesem Handy-Konzept wurde die Annahme getroffen, dass das Handy funktionsreduziert sein muss, wenn es mit Energie aus der Umgebung auskommen muss. Daher wurde der halbierte Ressourcenverbrauch eines Standard-Handys angenommen, woraus sich die Werte 9,1 kg/a abiotisch, 65 kg/a an Wasser und 0,5 kg/a an Luft ergeben (s. Abb. 24).

Abb. 24: Ressourcenverbrauch eines Null-Energie-Handys



Quelle: Eigene Berechnungen

10.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Die größten Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten werden beim abiotischen Ressourcenverbrauch und dem Wasserverbrauch sichtbar (s. Abb. 25).

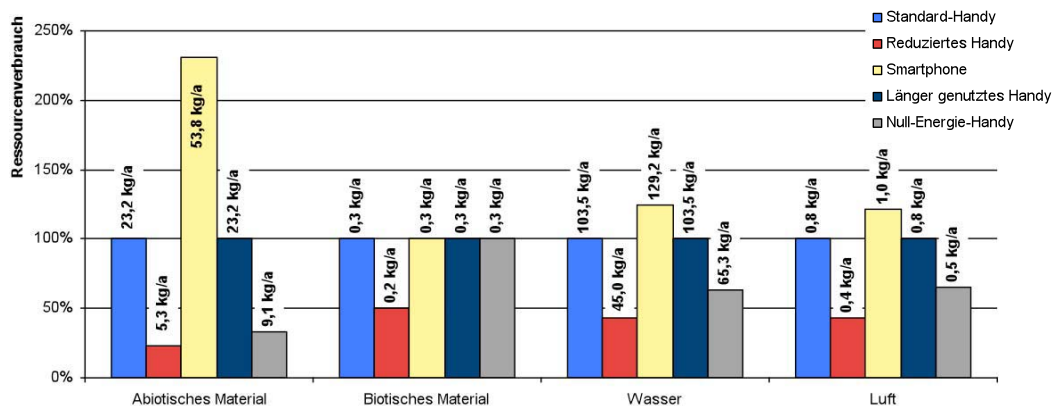
Der Verbrauch an biotischem Material ist bei fast allen Konzepten gleich, da sich dieser aus dem Bestandteil Verpackung ergibt und somit nur beim reduzierten Handy, bei dem auch an der Verpackung gespart wurde, um die Hälfte geringer ist.

Im Vergleich zum Standard-Handy benötigt das reduzierte Mobiltelefon nur etwa ein Fünftel der abiotischen Ressourcen und etwa ein Drittel des Wassers.

Das Handy-Konzept Smartphone dagegen hat den höchsten Verbrauch an Ressourcen insgesamt mit einem mehr als doppelt so hohen abiotischen Verbrauch und einem um etwa 40% höheren Verbrauch an Wasser. Wird ein normales Handy über einen beispielsweise doppelt so langen Zeitraum genutzt, kommt zwar der gleiche Ressourcenverbrauch zustande. Es kann jedoch auch hier mit Einsparungen gerechnet werden, die umso höher sind, je länger das Mobiltelefon genutzt wird.

Beim Null-Energie-Handy wurde die entsprechende neue Technologie vorausgesetzt, ohne deren eventuell zusätzlichen Ressourcenverbrauch einzukalkulieren. Human-Energy-Harvesting-Methoden sind zwar bereits in der Entwicklung. Es gibt aber noch keine Entwicklung, die klein genug für den Einbau in Mobiltelefone ist und gleichzeitig genügend Energie aus dem Umfeld umsetzen kann. Insofern ist dieser Ansatz noch hypothetisch. Wie viel an Ressourcen dadurch verbraucht werden würde, kann nicht abgeschätzt werden und wurde daher bei den Berechnungen außer Acht gelassen.

Abb. 25: Vergleich der Ressourcenverbräuche der verschiedenen Handy-Konzepte in den verschiedenen Kategorien



Quelle: Eigene Berechnungen

10.4.1 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass bei Mobiltelefonen Ressourceneffizienzpotenziale zu finden sind. Um diese umzusetzen, wäre in jedem Fall eine Bewusstseinsänderung beim Nutzer, aber auch beim Anbieter notwendig. Da der Verkauf von Handys weltweit nach wie vor stark ansteigt und viele der benötigten Rohstoffe zumeist aus Krisenregionen der Erde stammen, kann die jetzige Situation auch zu geopolitischen bzw. ressourcenpolitischen Konflikten führen. Eine längere, intensivere Nutzung der Rohstoffe und deren Rückgewinnung ist daher angebracht.

Ein reduziertes, ressourcenschonendes Mobiltelefon greift diesen Aspekt auf. Es benötigt weniger Ressourcen und bei Einbindung in ein Produkt-Service-System könnten nach Produktlebensende Rohstoffe zurückgewonnen werden. Problematisch könnte jedoch die Akzeptanz beim Nutzer ausfallen, sofern hier keine Änderung in Bewusstsein bzw. Gewohnheiten stattfindet. Geräte, die nur Basisfunktionen anbieten, bieten derzeit kaum Kaufanreiz.

Dieses Problem besteht bei Smartphones nicht. Hier werden jedes Jahr höhere Verkaufszahlen notiert. Dafür ist jedoch der Ressourcenverbrauch dieser Geräte höher. Werden jedoch andere Produkte tatsächlich durch ein solches Telefon ersetzt, was maßgeblich vom Verhalten des Nutzers abhängt, können wiederum Ressourcen für ebendiese Produkte eingespart werden. Somit ist hier einerseits die Möglichkeit einer deutlichen Ressourceneinsparung gegeben, andererseits die Gefahr eines Rebound-Effekts besonders groß im Falle, dass die mannigfaltigen Funktionen der Smartphones die Anschaffung anderer Geräte doch nicht verhindern.

Beim Konzept des länger genutzten Mobiltelefons wird zwar am anfänglichen Ressourceneinsatz nichts geändert, jedoch kann durch das Nutzerverhalten ein deutliches Einsparpotenzial entstehen. Eine diesbezügliche Änderung im Nutzerverhalten sollte durch Änderungen in Konstruktion bzw. Produktion (Betonung

der Haltbarkeit) und Vertrieb (Aufbau von Product-Service-Systemen) angeregt, bzw. gestützt werden.

Das Konzept des Null-Energie-Handys ist derzeit noch weitgehend hypothetisch zu erfassen, da die Technologie noch nicht vorhanden ist und keine Aussage über den Ressourcenaufwand getroffen werden kann. Wie in den Berechnungen erkennbar wird, macht der Stromverbrauch, zumindest nach dem deutschen Strommix, beim Verbrauch von Wasser und Luft einen erheblichen Teil des Gesamtressourcenverbrauch des jeweiligen Mobiltelefons aus. Insofern könnte hier ein Einsparpotenzial mit besonderen Vorteilen in der Nutzung kombiniert werden.

Ein Problem hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs bleibt die bisher mangelhafte Rückgewinnung und Entsorgung von Handys. Die zum Teil sehr wertvollen Inhaltsstoffe können mittlerweile fast vollständig rückgewonnen werden. Hier hätte ein Produkt-Service-System den größten Einfluss. Rohstoffe, die bereits in der Technosphäre sind, müssen nur noch recycelt werden und erfordern nicht mehr den Aufwand einer Neugewinnung. Wenn zusätzlich weniger Ressourcen eventuell mit geringerer Materialintensität verwendet werden können, birgt dies zusätzliches Einsparpotenzial. Anreize zum Aufbau von Produkt-Service-Systemen könnten daher eine effiziente Maßnahme für verschiedene Aspekte der Ressourceneinsparung darstellen.

Tab. 27: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Konzepte nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien im Vergleich zum heutigen Standard-Handy

Kriterium	Reduziertes Handy	Smartphone	Länger genutztes Handy	Null-Energie-Handy
Ressourceneinsatz	Niedrig	Höher	Niedrig	Sehr niedrig
Ressourceneffizienzpotenzial	Hohes Einsparpotenzial bei flächendeckender Verwendung	Hohes Einsparpotenzial bei tatsächlicher Einsparung anderer Geräte; ansonsten Gefahr von Rebound-Effekten	Mittleres Einsparpotenzial abhängig von der Nutzungsdauer: je länger, desto höher das Potenzial	Hohes Einsparpotenzial, sofern die Technologie nicht in hohem Maße zusätzliche Ressourcen verbraucht
Sonstige Umweltauswirkungen	Eher reduzierter Einfluss verglichen mit den Auswirkungen der bisherigen Mobiltelefon-Produktion. Bei Verwendung recycelter Materialien eventuell wesentlich geringerer Einfluss	Tendenziell stärkere Auswirkungen als bei derzeitiger Handy-Produktion, da mehr seltene Metalle benötigt werden, die unter für Mensch und Natur oft problematischen Bedingungen gewonnen werden. (z.B. Coltan im Kongo). Wirklicher Ersatz anderer Geräte kann die Situation ändern.	Dadurch dass weniger neue Handys produziert werden müssen, entstehen insgesamt weniger Umweltauswirkungen	Eher reduzierte Auswirkungen, wenn neue Technologie keine gegenteiligen Effekte verursacht.

Realisierbarkeit	Sofort umsetzbar, Technologie vorhanden	In absehbarer Zeit umsetzbar. Derzeit noch kritisch: ausreichende Stromversorgung, reduzieren der Technologie auf die gängige Handy-Größe	Sofort umsetzbar, bedarf einer Bewusstseinsänderung der Nutzer, aber auch Änderungen in Produktion und Vertrieb	Bedarf noch Forschungsarbeit
Wirtschaftliche Bedeutung	Hohe wirtschaftliche Bei Einbindung in ein Produkt-Service-System wird nicht mehr am Produkt, sondern an der Dienstleistung verdient. Kundendienst etc. ermöglicht Wertschöpfung im Inland	Hohe wirtschaftliche Bedeutung, da die Nachfrage nach Smartphones auch für den Geschäftsbereich relativ hoch ist.	Abgesehen von der generell hohen Bedeutung von Mobiltelefonen ist hier die Bedeutung eher gering, da weder mehr verkauft wird, noch auf andere Art und Weise daran verdient wird.	Hohe wirtschaftliche Bedeutung aufgrund besonderer Wettbewerbsvorteile, vermutlich hohe Nachfrage
Kommunizierbarkeit	Bewusstseinsänderung der Nutzer und Anbieter nötig. Größeres Service-Angebot. Beschränkung aufs Wesentliche durchaus kommunizierbar.	Anreiz vorhanden immer komplexere, bessere Produkte zu kaufen.	Derzeit schwer kommunizierbar, da Marketing auf den Verkauf neuer Produkte ausgelegt ist. Längere Nutzung widerspricht dem.	Sehr gut kommunizierbar, eindeutiger Vorteil: nie mehr Handy aufladen müssen, Strom sparen, kein Adapterproblem mehr im Ausland etc.
Übertragbarkeit	Reduzierte Produkte mit mehr Service (Produkt-Service-Systeme), Verwendung recycelter Materialien bzw. mit geringerer Materialintensität auch auf andere Produkte übertragbar	Prinzip Funktionsvielfalt übertragbar, im Elektronik-Bereich eher auch an anderen Produkten möglich, allerdings ist eine Überschneidung von Funktionen vieler Geräte der Ressourceneffizienz wenig dienlich.	Längere Nutzungsdauer setzt längere Funktionstüchtigkeit voraus; Prinzip in jedem Fall auf andere Produkte übertragbar.	Derzeit noch nicht absehbar, da Technologie noch nicht ausgereift. Prinzipiell möglich

Quelle: Auf Basis von Simon 2010

Quellenverzeichnis

- Abele, E. et al. (2008): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin: Springer.
- Blass, V.D. et al. (2006): End-of-life Management of cell phones in the United States. Santa Barbara, CA: University of California, 2006
- Federico, A.; Hinterberger, F.; Muscemi, F. (2001): Application of the MIPS concept in Italy: Two case studies, Agenzia per lo Sviluppo sostenibile, Rom.
- Huisman, J. (2004): QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden, TU Delft.
- Kotakorpi, E.; Lähteenoja, S.; Lettenmeier, M. (2008): Household MIPS. The Finnish Environment 43e/2008. Ministry of the Environment: Helsinki
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Schmidt-Bleek, F. (2007): Nutzen wir die Erde richtig? Die Leistungen der Natur und die Arbeit des Menschen. Frankfurt: Fischer.
- Simon, V. (2010): Ressourceneffizienzkriterien im Design am Beispiel Mobiltelefon. Diplomarbeit, Fachbereich Industriedesign, Universität Duisburg-Essen.

11 Green IT – Ressourceneffizienzpotenziale von Server Based Computing

Daniel Maga (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

Volker Knappertsbusch (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

Dr.-Ing. Hartmut Pflaum (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

Dr.-Ing. Markus Hiebel (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

11.1 Einleitung

Der Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK) ist durch hohe Zuwachsraten an unterschiedlichen Produkten, Dienstleistungen und Anwendungen (inkl. der notwendigen Infrastruktur), sehr schnelle Produkt- und Innovationszyklen sowie den Einsatz sehr vieler unterschiedlicher und z. T. sehr komplexer Werkstoffe/-verbünde gekennzeichnet (BMBF 2007). Dies trifft sowohl auf die Endprodukte (z. B. Computer, Handy) als auch die dahinterliegende Infrastruktur (z. B. Server, Netze) zu. Neben dem Energieverbrauch im Bereich IuK gerät zunehmend auch der Aspekt Rohstoffe in den Fokus (Fichter 2010). In der Arbeit (Maga 2010) wurden Ressourceneffizienzpotenziale in der Green IT am Beispiel von Thin-Clients und PCs ermittelt. Zusätzlich wurden Umweltexternalitäten als Ursache für ein Marktversagen in der IT-Branche am Beispiel der beiden IT-Varianten untersucht.

11.2 Vorgehensweise

Die Ressourceneffizienzpotenziale durch Server Based Computing, also die zentrale Bereitstellung von Anwendungsprogrammen auf einem (oder mehreren) leistungsfähigen Servern, wurden mittels der Material-Intensitäts-Analyse (Schmidt-Bleek 1998) ermittelt.

11.2.1 Untersuchungsobjekte

Untersuchungsobjekte sind das Thin-Client Modell „IGEL 3210 LX Compact“ einschließlich Server und ein Standard Office Desktop PC (Tabelle 59 aus IVF 2007, S. 122) (siehe Abb. 26).

Abb. 26: Thin-Client (links) vs. PC (rechts)



Quelle: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.

11.2.2 Definition der Service-Einheit

Die Service-Einheit ist definiert als eine PC- bzw. Thin-Client-gestützte Versorgung eines Anwenders mit IT-Dienstleistungen für einen Zeitraum von 5 Jahren.

11.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Der Untersuchungsrahmen schließt den ganzen Lebenszyklus der Produkte (Materialgewinnungs-, Fertigungs-, Distributions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase) ein. Die Materialphase schließt alle Materialien, die im PC bzw. im Thin-Client einschließlich Serveranteil verbaut sind, ein. In der Fertigungsphase werden der Energieverbrauch von Verarbeitungsprozessen, der Kunststoffverbrauch durch Verschnitte und der Transport von Einzelkomponenten aus Asien bewertet. In der Distributionsphase werden die Transportwege, der Stromverbrauch durch die Beleuchtung der Verkaufsfläche, der Gasverbrauch zur Beheizung der Verkaufsfläche sowie das Verpackungsmaterial berücksichtigt. In der Nutzungsphase wird der mit den IT-Geräten verbundene Stromverbrauch betrachtet. Im Hinblick auf den Thin-Client bedeutet dies eine zusätzliche Berücksichtigung des Stromverbrauchs des Servers und dessen Kühlung. Als Kühlleistung wird der gleiche Stromverbrauch angesetzt wie der Server Strom verbraucht (s. Fraunhofer UMSICHT 2008). Die Entsorgungsphase wird nur zur Ermittlung der externen Kosten, nicht aber des Materialinputs pro Serviceeinheit berücksichtigt, da sie kaum Einfluss auf das Gesamtergebnis hat und bereits größtenteils in den verwendeten Materialintensitäten berücksichtigt ist.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Zur Bilanzierung des Materialverbrauchs des Servers wurden die Werte der Sachbilanz des Office PCs mit 1,5 multipliziert, da der Server leistungsfähiger ausgestattet ist. Der Faktor 1,5 leitet sich aus dem Gewichtsvergleich eines

Servers (ca. 16 kg) mit einem Standard-PC (8,5-12,9 kg) ab (s. Fraunhofer UMSICHT 2008).

- Die Kühlung des Serverraums wird mit dem gleichen Wert angesetzt, wie der Stromverbrauch des Servers (s. Fraunhofer UMSICHT 2008).
- Jedem Thin-Client werden 1/35 des Servers zugerechnet, da ca. 35 Thin Clients durch einen Server bedient werden können (s. Fraunhofer UMSICHT 2008).
- Fehlen MI-Werte von Bauteilen, wird die Zusammensetzung des Bauteils durch seine Inhaltsstoffe auf Basis von Angaben des MEEuP-Reports geschätzt (s. EU 2005).

11.2.4 Datenerfassung

Die Massen der im Thin-Client verbauten Komponenten wurden im Rahmen einer Studie durch Mitarbeiter von Fraunhofer UMSICHT ermittelt (s. Fraunhofer UMSICHT 2008). Ansonsten wird für die Materialgewinnungs-, Fertigungs-, Distributions- und Entsorgungsphase auf Daten der EuP-Studie (IVF 2007) zurückgegriffen. Die Daten zur Betriebsphase (Stromverbrauch) von Thin-Client, Server und PC wurden aufgrund einer höheren Genauigkeit und zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit selbst durch Mitarbeiter von Fraunhofer UMSICHT messtechnisch ermittelt.

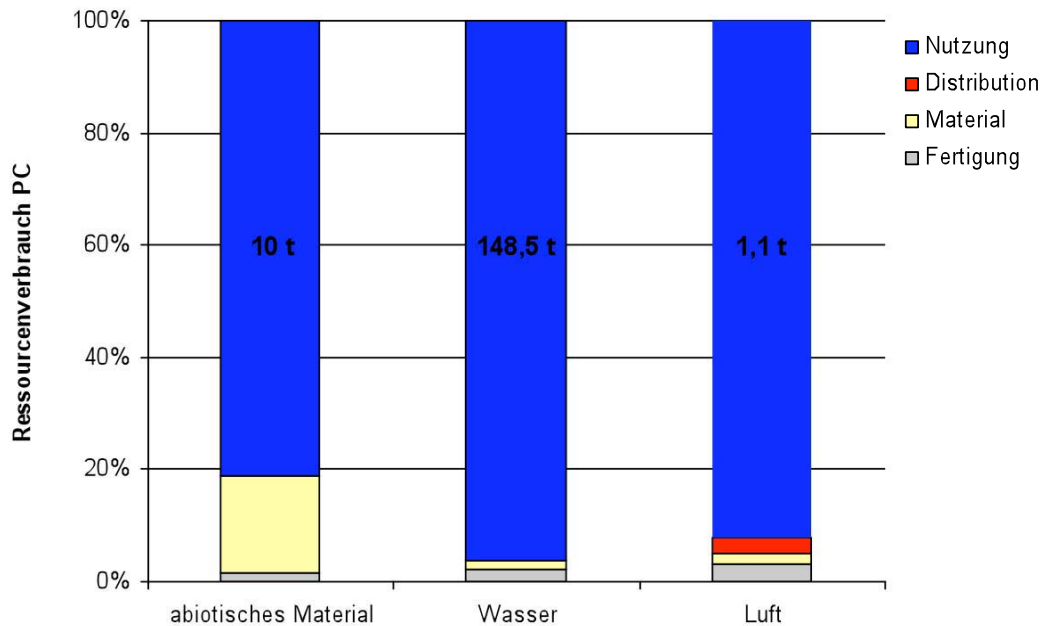
11.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus den in der Sachbilanz ermittelten Materialien, Energiemengen und Transportwegen wurde unter Einbezug der vorgelagerten Stoffströme nach dem MIPS-Konzept der gesamte Ressourcenverbrauch für den Thin-Client bzw. den PC berechnet.

11.3.1 Ressourcenverbrauch des PCs

Der Office PC verursacht über den gesamten Lebenszyklus einen abiotischen Materialverbrauch von 10,0 t, einen Wasserverbrauch von 148,5 t und einen Luftverbrauch von 1,1 t. Eine prozentuale Aufteilung der Stoffströme ist in Abbildung 2 dargestellt. In den 3 Kategorien „abiotisches Material“, „Wasser“ und „Luft“ hat jeweils die Nutzungsphase den höchsten Anteil (81 % - 96 %). In der Kategorie „abiotisches Material“ hat zudem noch der Ressourcenverbrauch des im PC eingesetzten Materials einen nennenswerten Anteil (17 %/1,73 t). Auch in der Kategorie „Wasser“ geht die Materialphase mit ca. 2,3 t Wasserverbrauch ein, was jedoch in Relation zu dem gesamten Wasserverbrauch eher gering ist (1,5 %). Der Verbrauch an „biotischem Material“ sowie „landwirtschaftlicher Bodenbewegungen“ ist so gering, dass er in Abb. 27 nicht berücksichtigt wird.

Abb. 27: Ressourcenverbrauch (abiotisches Material, Wasser, Luft) in der Nutzungsphase (Nutzung), in der Distributionsphase (Distribution), durch den Einsatz von Materialien (Material) und für die Fertigung der Komponenten (Fertigung) für den Office PC



Quelle: Maga 2010

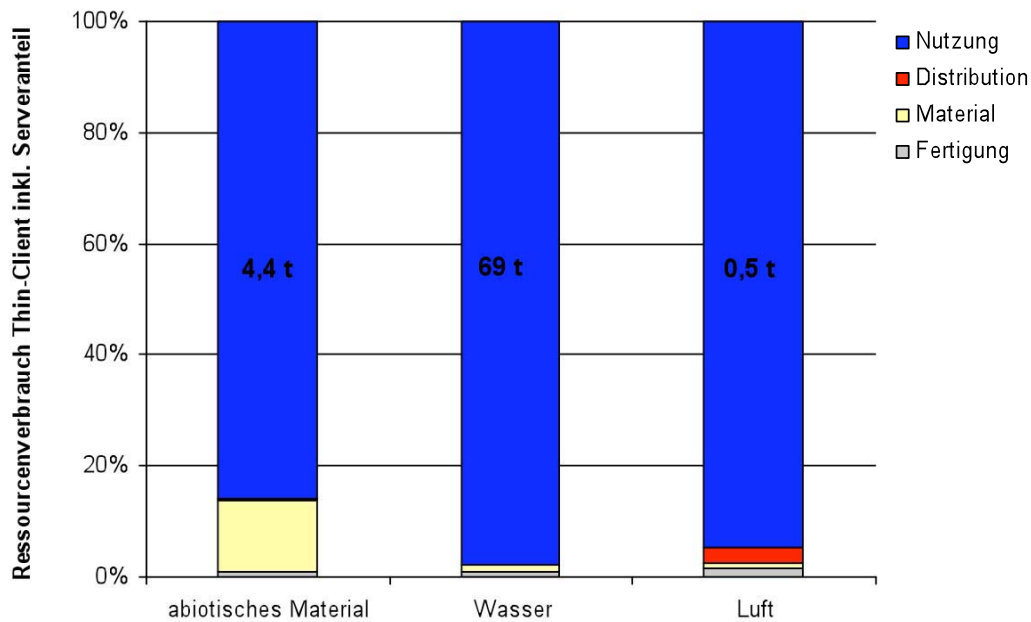
11.3.2 Ressourcenverbrauch des Thin-Client inkl. Serveranteil

Der Thin-Client inkl. Serveranteil verursacht über den gesamten Lebenszyklus einen abiotischen Materialverbrauch von 4,4 t, einen Wasserverbrauch von 69 t und einen Luftverbrauch von 0,5 t. Eine prozentuale Aufteilung der Stoffströme ist in Abb. 28 dargestellt. Wie auch beim Office PC macht die Nutzungsphase in allen drei Kategorien den größten Anteil aus mit 86 % bis zu 98 %.

Auch bei den Thin-Clients hat in der Kategorie „abiotisches Material“ der Materialeinsatz einen nennenswerten Anteil von 13 % (0,6 t). In der Kategorie „Wasser“ werden durch den Einsatz von Material 0,7 t Wasserverbrauch bilanziert, was relativ gesehen 1,1 % entspricht.

Der Verbrauch an „biotischem Material“ sowie „landwirtschaftliche Bodenbewegungen“ ist auch hier so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

Abb. 28: Ressourcenverbrauch (abiotisches Material, Wasser, Luft) in der Nutzungsphase (Nutzung), in der Distributionsphase (Distribution), durch den Einsatz von Materialien (Material) und für die Fertigung der Komponenten (Fertigung) für den Thin-Client inkl. Serveranteil



Quelle: Maga 2010

11.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Zur Abschätzung der Potenziale wurden die in Tab. 28 dargestellten Verkaufszahlen von PCs und Thin-Clients in Deutschland herangezogen.

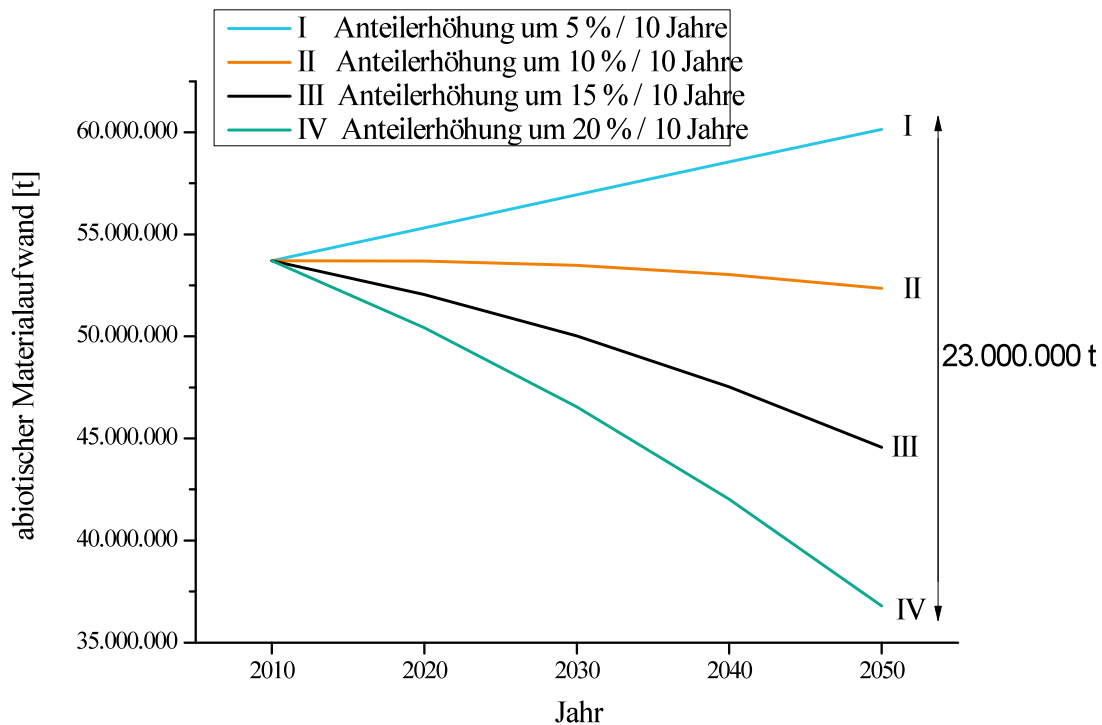
Tab. 28: Verkaufszahlen von PCs und Thin-Clients in der Bundesrepublik Deutschland

Jahr	2004	2005	2006	2007	2008
Office PC	5.080.982	5.197.626	4.855.773	4.954.080*	5.173.605*
Thin-Client	141.410	217.972	224.472	260.167	296.558*
Insgesamt	5.222.392	5.415.598	5.080.245	5.214.247	5.470.163

Quelle: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (2008), Studie: Ökologischer Vergleich der Klimarelevanz von PC und Thin Client Arbeitsplatzgeräten 2008, Oberhausen, S. 78.

Zur Ermittlung des Einsparpotenzials für den Materialinput werden im folgenden Szenario ausgehend von einer für das Jahr 2010 geschätzten Verkaufszahl von 5,5 Millionen IT-Geräten in Deutschland 4 Szenarien berechnet, die von unterschiedlichen Thin-Client Marktanteilerhöhungen um I) 5 %, II) 10 %, III) 15 % und IV) 20 % in jeweils 10 Jahren ausgehen. Des Weiteren wird angenommen, dass im Jahr 2050 7 Millionen IT-Geräte verkauft werden, was einer durchschnittlichen Zunahme der Verkäufe um 0,59 % (Referenzjahr 2008) entspricht. Die möglichen Entwicklungen des abiotischen Materialaufwands für die 4 Szenarien sind in Abb. 29 dargestellt.

Abb. 29: Entwicklung der durch PC und Thin-Client bedingten abiotischen Materialaufwands bei unterschiedlichen Marktanteilen bis 2050



Quelle: Maga 2010

Wie in Abb. 29 dargestellt, nimmt in den Szenarien II, III und IV (bei einem Marktanteil der Thin-Clients im Jahr 2050 von 45 %, 65 % und 85 %) trotz Zunahme der jährlichen Verkaufszahlen an IT-Geräten von 5,5 Mio. (2010) auf 7 Mio. (2050), der abiotische Materialaufwand im Zeitverlauf bis zum Jahr 2050 ab. Läge der Marktanteil der Thin-Clients niedriger als im Szenario I, würde die Zunahme der Verkäufe das Einsparpotenzial durch Substitution von PC durch Thin-Client überkompensieren. Das bedeutet, dass es im Zeitverlauf zu einer Zunahme des jährlichen globalen Materialaufwands käme. Zu bedenken ist, dass sich die IT-Geräte im Zeitverlauf weiter entwickeln werden. Bereits gegenwärtig ist im Rahmen der Green IT Diskussion die Tendenz zu kleineren und energiesparenderen PCs erkennbar. Eine solche Entwicklung würde das zukünftige Einsparpotenzial durch Substitution von PC durch Thin-Client schmälern.

11.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Mittels der Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS Konzept wurde die Material- und Energieintensität von Thin-Clients und PCs in den Kategorien abiotischer Materialaufwand, Wasser und Luft bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass über den ganzen Lebenszyklus hinweg betrachtet in allen Kategorien der Verbrauch an Material, Wasser und Luft beim PC ca. doppelt so groß ist wie beim Thin-Client. Absolut gesehen liegen bei einer angenommenen Nutzungsdauer der IT-Geräte von 5 Jahren der abiotische Materialaufwand pro Thin-Client einschließlich Serveranteil bzw. PC bei ca.

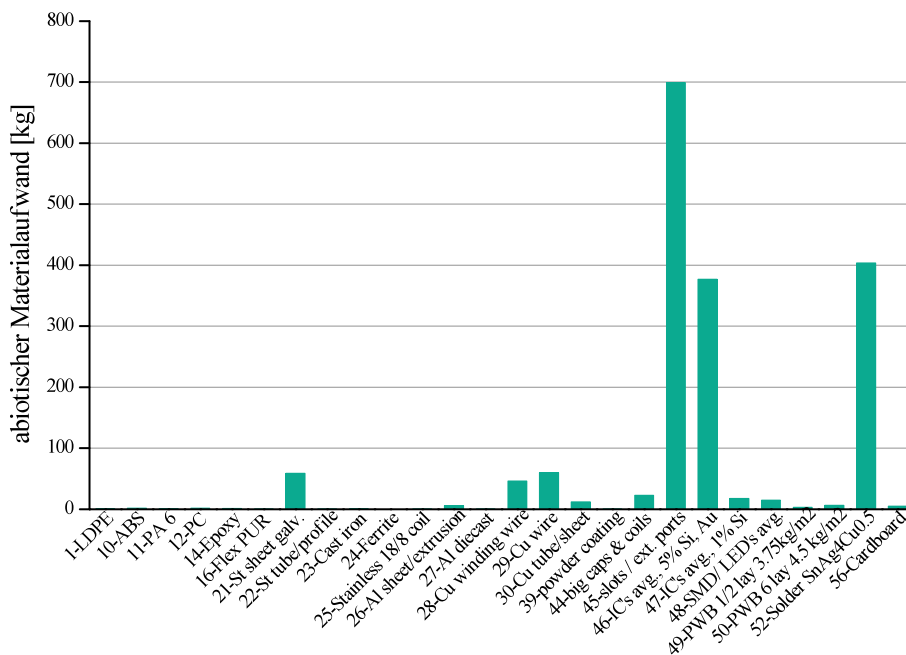
4,5 t bzw. 10 t und der im gesamten Lebenszyklus verursachte Wasserverbrauch/Luftverbrauch beim Thin-Client bzw. PC bei ca. 70 t/0,5 t bzw. bei ca. 150 t/1,1 t. Eine Aufschlüsselung der Materialverbräuche auf die Lebenszyklusphasen wie in Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt zeigt, dass der größte Materialaufwand (ca. 90 %) in der Nutzungsphase liegt, in der die IT-Geräte mit Strom versorgt werden. Deshalb sollten aus ressourcenökonomischer Sicht stromsparende IT-Geräte wie der Thin-Client verstärkt gefördert werden und weitere Anstrengung zur Minimierung des Stromverbrauchs unternommen werden.

Einen weiteren Einfluss auf den Ressourcenverbrauch hat der Einsatz von Materialien in den IT-Geräten.

Eine nähere Betrachtung des abiotischen Materialaufwands für im PC eingesetzte Materialien zeigt, dass „45-slots /ext. Ports“ (Steckerverbindungen), „46-IC's avg., 5 % Si, Au“ (Schaltkreise) und „52-Solder Sn Ag4 Cu0.5“ (Lötmetall) mit einem erhöhtem abiotischen Materialaufwand verbunden sind (Abb. 30). Beim Thin-Client fallen ebenfalls die Steckerverbindungen und das Lötmetall ins Gewicht. Hinzu kommt das „98-controller board“ (s. Abb. 31).

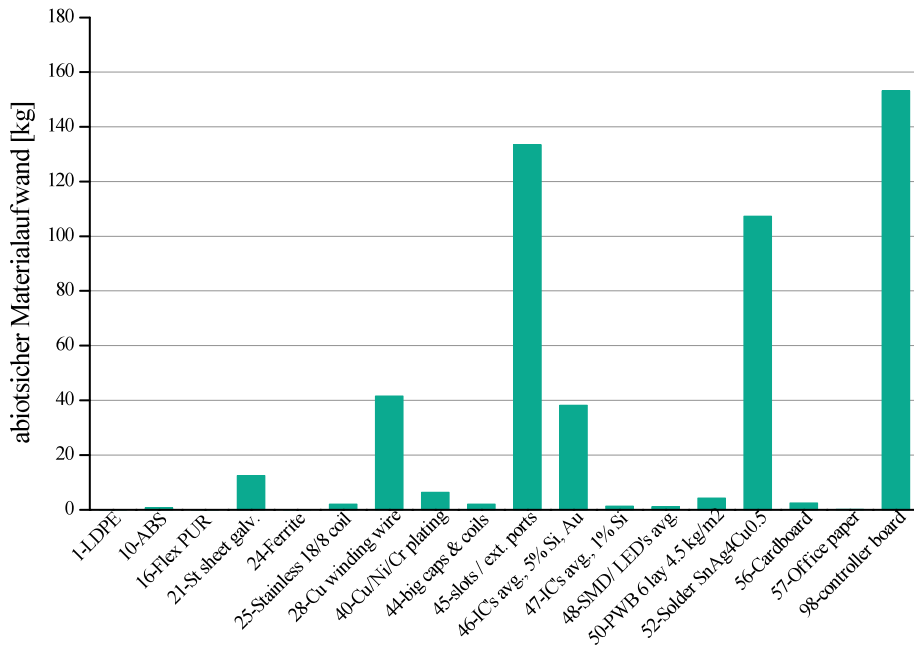
Diese IT-Gerätekomponenten enthalten Edelmetalle wie Silber und Gold, die sehr ressourcenintensiv sind. Weitere Metalle, die in IT-Geräte eingesetzt werden sind (Edel-) Metalle wie Palladium, Tantal, Kupfer, Nickel, Chrom und Eisen. Insgesamt enthält der Thin-Client inkl. Serveranteil weniger dieser Metalle, so dass er dem PC vorzuziehen ist. Ziel muss es in Zukunft sein, den Einsatz von ressourcenintensiven Metallen in IT-Geräten noch weiter zu reduzieren und die Kreislauffähigkeit der Metalle sicherzustellen.

Abb. 30: Abiotischer Materialaufwand beim PC durch Materialaufwand



Quelle: auf Basis von (Maga 2010)

Abb. 31: Abiotischer Materialaufwand beim Thin-Client durch Materialaufwand



Quelle: auf Basis von (Maga 2010)

Weitere Kriterien zur Beurteilung des Einsatzes von Thin-Clients sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 29: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Anlagen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Thin-Client
Ressourceneinsatz	niedrig
Ressourceneffizienzpotenzial	<p>Als eine Kenngröße zur Ermittlung des Ressourceneffizienzpotenzials von Thin-Clients kann der Quotient des abiotischen Materialaufwands des PCs abzüglich des abiotischen Materialaufwands des Thin-Clients und des abiotischen Materialaufwands des PCs berechnet werden. Hier ergibt sich:</p> $\text{Ressourceneffizienzpotenzial} = \frac{9981 - 4421}{9981} = 0,56$ <p>Im Bezug auf Wasser und Luft ergibt sich jeweils ein Quotient von 0,54. Dies bedeutet, dass ca. die Hälfte des Ressourcenverbrauchs zur Bereitstellung von IT-Dienstleistungen durch die Substitution von PCs mit Thin-Clients eingespart werden kann.</p>
Sonstige Umweltauswirkungen	Weitere Umweltauswirkungen, wie die Wirkung von Feinstäuben, lassen sich nicht anhand der MIPS Methodik erfassen, können aber mittels der ökobilanziellen Betrachtung mit der MEEuP-Methodik (s. EU 2008) abgebildet werden. Eine detaillierte Beschreibung weiterer Umweltauswirkungen enthält die Studie: Ökologischer Vergleich der Klimarelevanz von PC und Thin Client Arbeitsplatzgeräten 2008 (s. Fraunhofer UMSICHT 2008).
Realisierbarkeit	Die Realisierbarkeit der Substitution von PC durch Thin-Client ist auf Unternehmensebene gut umsetzbar, im privaten Bereich ergeben sich hingegen Schwierigkeiten wie z. B. bezüglich der Nutzung von Servern. Zudem kann die Tatsache, dass die eigenen Daten nicht auf dem eigenen PC sondern auf einem externen Server abgespeichert sind, zu einer geringeren Akzeptanz führen.
Wirtschaftliche Bedeutung	Green IT wird aufgrund einer global immer stärker zunehmenden Vernetzung und der globalen Abnahme der Ressourcen voraussichtlich in der Zukunft von großem wirtschaftlichem Interesse sein. Der Trend geht gegenwärtig zu einer immer kürzer werdenden Lebensdauer von Elektro- und Elektronikgeräten und immer schneller drängen neue, innovativere und leistungsstärkere Geräte auf den Markt. Damit steigt die Masse an Altgeräten stetig an und verlangt nach Lösungen zur umweltgerechten Produktion und Entsorgung bzw. zur Rückführung der Ressourcen in den Wirtschaftskreislauf. Deshalb werden sich effiziente IT-Geräte und solche mit guter Rückführbarkeit der Materialien langfristig am Markt durchsetzen. Bereits in der Verwertung des Elektroschrotts steckt ein enormes wirtschaftliches Potenzial, was gleichzeitig zur nachhaltigen Sicherung von knappen Ressourcen beiträgt.
Kommunizierbarkeit	Die Kommunizierbarkeit von Green IT ist als gut einzuschätzen, zumal gegenwärtig ein klarer Trend zu effizienten Technologien erkennbar ist. In wie weit die Steigerung der Material- und Energie-Effizienz von IT-Geräten auch zur gesamten Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch IT-Geräte führt (Effektivität), hängt stark von der Entwicklung der zukünftigen Verkaufszahlen von IT-Geräten ab.
Übertragbarkeit	Die in der Studie über den Vergleich von Thin-Client und PC festgestellte Relevanz des Energieverbrauchs lässt sich auf andere Felder der Green IT übertragen. Durch die energieeffiziente Gestaltung von Green IT Technologien können zukünftig sowohl Energie als auch Material und somit Kosten eingespart werden. Ziel muss es generell sein die Energieeffizienz neuer IT-Geräte bei verringertem Einsatz von Materialien insb. von Edelmetallen zu steigern.

Quelle: auf Basis von (Maga 2010)

11.6 Quellenverzeichnis

- BMBF (Hrsg.) (2007): Informations- und Kommunikationstechnologien in Deutschland: Innovationsindikatoren zur IuK-Wirtschaft und Einsatz von IuK als Querschnittstechnologie, Berlin.
- IVF (2007): Industrial Research and Development Corporation (Hrsg.), Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors - Final Report (Task 1-8).
- EU (2005): Methodology Study Eco-design of Energy-using Products (MEEuP-Report), Brüssel.
- Fichter, K., J. Clausen (2010): Einsparpotenziale von Thin Clients & Server Centric Computing auf nationaler und europäischer Ebene In: Green-IT, Virtualisierung und Thin Clients, Vieweg+Teubner (Hrsg.), Wiesbaden.
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.) (2008), Ökologischer Vergleich der Klimarelevanz von PC und Thin Client Arbeitsplatzgeräten 2008, Oberhausen.
- Maga (2010): Ressourceneffizienzpotenziale der Green IT und Umweltexternalitäten als Ursache für ein Marktversagen in der IT-Branche am Beispiel von Thin-Clients und PCs, Projektbericht Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen.
- Rohn, H., Lang-Koetz, C., Pastewski, N., Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Schmidt-Bleek, F., Bringezu S., F. Hinterberger, Liedtke, C., J. Spannenberg, Stiller H., M. J. Welfens (1998), MAIA Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept, Berlin.

12 Green IT – Ressourceneffizienzsteigerung bei IKT – Displaytechnologien im Vergleich

Katrin Werner (Universität Kassel)

Dr. Sylvie Geisendorf (Universität Kassel / FB Umwelt- und Verhaltensökonomik)

Bastian Lang (Universität Kassel / Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)

12.1 Einleitung

IKT ist die gängige Abkürzung für Informations- und Kommunikationstechnik. Nach Definition der OECD²⁵ „sollen unter IKT alle Einrichtungen verstanden werden, die unter Menschen eine Übertragung von Informationen oder deren Austausch in digitalisierter Form und auf elektronischem Wege ermöglichen“ (Statistisches Bundesamt 2007). Ziel der Arbeit ist die Erstellung einer zukunftsweisenden Handlungsempfehlung auf Grundlage des Ressourcen- und Materialverbrauchs der IKT. Bedingt durch die stetig wachsende Nachfrage von IKT und Integration in jeden Aspekt des Lebens, ist eine Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz notwendig. Die IKT bietet ein breites Feld an Diensten und Geräten und in fast allen sind Bildschirme enthalten. Daher liegt der Fokus dieser Studie auf den drei verschiedenen Displayarten Flüssigkristallbildschirme (LCD), Plasma Display Panels (PDP) und organische Leuchtdioden (OLED). Anhand einer vorgreifenden Literaturrecherche scheinen diese Technologien zum Teil große Ressourceneffizienzpotenziale zu besitzen. Sie beinhalten häufig seltene Metalle, für welche Beschaffungsrisiken bestehen und die einen hohen Ressourcenverbrauch verursachen.

12.2 Vorgehensweise

Drei verschiedene Displaytechniken wurden in der Studie untersucht und miteinander verglichen, um das ressourcenschonendste Display zu ermitteln. Zur Vergleichbarkeit der Techniken erfolgte eine Normierung auf eine einheitliche Displaygröße von 1 m². Die Serviceeinheit wurde mit 1 Jahr Nutzung eines Bildschirms von 1 m² Größe festgelegt. Die Ressourcenaufwendungen zur Herstellung der Displays fallen gegenüber der Nutzungsphase nur schwach ins Gewicht, bspw. bei LCDs sind diese <10 % beim Verbrauch von abiotischen und biotischen Materialien sowie Wasser und Luft.

²⁵ Organization for Economic Cooperation and Development

12.2.1 Untersuchte Produkte

Als erste Bildschirmart werden Flüssigkristalldisplays betrachtet. Bei diesen muss das Licht einen ersten Polarisationsfilter durchdringen, um an einem bestimmten Punkt auf dem Bildschirm einen hellen Bildpunkt zu erzeugen. Das Licht dringt horizontal in die Flüssigkristallschicht ein, hier kann die Ausrichtung des Lichtstrahls verändert werden. Durch die von außen gesteuerte elektrische Spannung können die Flüssigkristalle so gedreht werden, dass das Licht entweder passieren kann oder ablenkt wird. In einem Farbfilter, bestehend aus Rot, Grün und Blau, wird dann die Farbe des Pixels definiert. Der zweite Polarisationsfilter ist nur durchlässig für parallel zu ihm polarisierte Lichtstrahlen. So können zusätzlich verschiedene Helligkeitswerte des Pixels bestimmt werden. Mit der elektronischen Steuerung und den Polarisationsfiltern kann demzufolge genau bestimmt werden, an welchen Stellen das Licht durchdringt (Kersten 2009). Aktiv-Matrix-LCDs verwenden Dünnschichttransistoren²⁶ oder Metal-Insulator, Metal-Pixel Switches, bestehend aus amorphem Silizium. Die Transistoren dienen der Ansteuerung der einzelnen Pixel. Die Ansteuerung erfolgt jedoch nicht direkt, sondern extern über Treiberschaltungen, die sich nicht direkt auf dem Display befinden (Dasow 2001).

Als zweite Displayart werden Plasma Display Panels untersucht. Hier befinden sich die Pixel zwischen zwei Glasplatten. „Die Innenflächen der Bildpunkte werden mit farbigem (grün, blau und rot) UV-sensitivem Phosphor beschichtet“ (Schweikle 2009, S.5). Zwischen den Glasplatten befindet sich Neongas oder Xenon, welches durch elektrische Signale gezielt angesteuert und ionisiert wird. Dabei wird das ionisierte Gas für einen kurzen Moment zu Plasma, und Energie wird als Licht freigesetzt.

Dritte Displayart sind die neuartigen organischen Leuchtdioden (OLED). Verschiedenfarbige Polymerschichten sind von einer Anode und einer Kathode umgeben. Durch Anlegen einer Spannung werden „Löcher aus der Anode in das höchste besetzte molekulare Orbital und Elektronen aus der Kathode in das niedrigste unbesetzte molekulare Orbital der organischen Schicht injiziert“ (May 2005). Bei der Rückkehr in den Grundzustand, also beim Zerfall der Ladung, wird sichtbares Licht²⁷ freigesetzt. Darüber hinaus ist die OLED zu 70 % transparent. Diese Eigenschaft eröffnet den Einsatz von Displays in völlig neuen Gebieten. Die OLED mit einer flexiblen Schicht, als Ersatz für Glas, ist biegsam und erreicht somit völlig neue Nutzungsbereiche.

²⁶ Thin Film Transistors = TFT

²⁷ Elektrolumineszenz

Tab. 30: Übersicht über die Displayarten

	Flüssigkristalldisplay (LCD)	Plasma Display (PDP)	Organische Leuchtdiode (OLED)
Funktionsweise	Elektrisch gesteuerte Flüssigkristalle zur Beeinflussung des Lichts in den Pixeln	Elektrische Entladung von Edelgasen bringt verschiedenfarbige Phosphorschichten zum Leuchten	Durch Elektrische Signale wird Licht in hauchdünnen Polymer-schichten erzeugt
Vorteile	Großes Anwendungsfeld, Flachbildschirm	Leuchtende Farben, breiter Blickwinkel	Flexibel, bis zu 70% transparent, geringer Energieverbrauch
Energieverbrauch (55“ Display)	244 W/m ²	444 W/m ²	70 W/m ²

Quelle: Eigene Darstellung

12.2.2 Definition der Service-Einheit

Zur Vergleichbarkeit wurde die Nutzung von 1 m² Displayfläche über ein Jahr als Serviceeinheit festgelegt. Bisher existieren keine OLED Displays in dieser Größe, wohingegen es LCD und PDP in dieser Größe gibt. Zur Berechnung wurde bei sämtlichen Displays ein Format von 16:9 angenommen.

12.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Alleine in Deutschland besitzen 96 % der Haushalte je 1,5 TV-Geräte, wobei nur jeder vierte Haushalt einen Flachbildfernseher besitzt. Allerdings besitzen auch 80 % der Haushalte einen Computer (Statistisches Bundesamt 2010, S.12f). 2009 wurden in Deutschland etwa 3,3 Mio. Computer-Monitore (LCD und CRT) sowie 7,6 Mio. LCD-TV-Geräte und 750 tausend PDP-Geräte verkauft. (Gfu 2010)

Im Nachfolgenden werden vor allem die Displayarten LCD und PDP betrachtet. Anschließend erfolgt ein Rückschluss auf OLEDs.

12.2.4 Herstellung

Bei einer Studie im Vereinigten Königreich Großbritannien und Nordirland (UK) zur Recyclingfähigkeit von Displays, sind unter andere folgende Daten erhoben worden:

Tab. 31: Typisches Produktgewicht verschiedener Displayarten in der UK

	LCD TVs	Plasma TVs
Gewichtsspektrum	8,4 - 24 kg	25,5 - 35,7 kg
Spektrum Bildschirmgröße	20 – 40 Zoll	32 – 42 Zoll

Quelle: Cryan et al. 2010, S.10

Mithilfe dieser Informationen, ließ sich ein 60 Zoll (~1 m²) Display, über eine lineare Interpolation berechnet. Die sich so ergebenden Monitorgewichte finden bei der Materialintensitätsberechnung Verwendung.

Tab. 32: Monitorgewichte

	LCD TVs	Plasma TVs
Gewicht eines 60 Zoll Monitors	39,60 kg	54,06 kg

Quelle: Eigene Berechnung

In einem weiteren Teil der Recycling-Studie sind die unterschiedlichen Materialien bei TV-Geräten erhoben worden. Diese lagen als prozentuale Mittelwerte über sämtliche, in der Studie zerlegten Displays einer Art vor. Daraus ergab sich die nachfolgende Tabelle:

Tab. 33: Berechnungen der Materialzusammensetzung eines 60 Zoll Bildschirms

Material	LCD TVs	Plasma TVs
ABS	2,38 kg	0,54 kg
PCABS	2,38 kg	1,40 kg
PC	1,58 kg	0,00 kg
PS	4,35 kg	0,04 kg
PMMA	0,79 kg	0,00 kg
Andere Kunststoffe	0,79 kg	0,18 kg
Dünne Schichten	0,79 kg	0,00 kg
Glasschichten	1,58 kg	10,27 kg
Eisen	18,21 kg	14,06 kg
Nichteisenmetalle	1,98 kg	12,16 kg
Leiterplatten	1,58 kg	4,86 kg
Kabel	0,79 kg	1,36 kg
Feinstoffe	1,98 kg	5,40 kg
Andere Stoffe	0,40 kg	3,78 kg
Gesamt	39,60 kg	54,06 kg

Quelle: auf der Basis von (Cryan et al. 2010, S.44)

Es zeigt sich, dass LCDs aus deutlich mehr Kunststoff und Eisen bestehen als PDPs. Diese bestehen dafür aus anderen Nichteisenmetallen, welche zumeist eine höhere

Materialintensität aufweisen. An dieser Stelle wurde angenommen, dass es sich dabei hauptsächlich um Aluminium handelt.

Informationen über die „Dünnen Schichten“ des LCDs konnten einer anderen Studie entnommen werden:

Tab. 34: Materialübersicht Dünne Schichten - LCD-Display

	Schichtdicke	Gewicht pro m²
Silicium	900 nm	0,000282 kg
Chrom	450 nm	0,003236 kg
Aluminium	250 nm	0,000675 kg
Flachglas	1,4 mm	3,5 kg
Tantal	250 nm	0,004163 kg
Molybdän	250 nm	0,00257 kg
Indiumzinn-oxid (ITO)	50 nm	0,00006 kg

Quelle: Nazeeruddin et al. 2003

Die Daten dieser Studie passen aufgrund des Schichtgewichtes (0,79 kg vs. 3,51 kg) nicht exakt zur Recycling-Studie. Daher wird eine Verminderung der Flachglasschichtdicke seit 2003 angenommen. Durch die Abschätzung reduziert sich die Schichtdicke des Glases in den „dünnen Schichten“ auf 0,3 mm. Hierzu kommen allerdings noch einmal etwa 0,7 mm aus dem allgemeinen Monitoraufbau. Insgesamt scheint dieser durchaus realistisch zu sein. (Evans et al. 2010, S.36)

12.2.5 Nutzungsphase

Aus einer Studie des BUND (BUND 2008) geht der Leistungsbedarf der Monitore hervor, bei dieser wurden Daten von über 400 Monitoren erhoben. Da die Leistung der einzelnen Monitore sehr stark von der Größe abhängt, wurden in dieser Analyse nur Monitore über 46 Zoll berücksichtigt. Hieraus ergaben sich folgende Daten für ein 60 Zoll TV-Gerät:

Tab. 35: Übersicht Leistungsaufnahme

Bildschirmdiagonale	60 Zoll (1,52 m)
LCD	294,12 W
PDP	532,17 W

Quelle: Eigene Berechnung

Diese Zahlen sind relativ niedrig, dies liegt am Skalierungseffekt. Je größer das Display, desto höher ist sein Energiebedarf, pro Fläche sinkt er allerdings. Die Technologieentwicklung seit 2008 führt zu weiteren Verbesserungen im Bezug auf den Energiebedarf, wie aktuelle Produktdatenblätter belegen (Grundig 2010).

Die tägliche Nutzungsdauer von TV-Geräten liegt in Deutschland derzeit bei etwa 3,5 h, wobei die Geräte etwa 5 Jahre im Einsatz sind (Statistisches Bundesamt 2007). Aus diesen Zahlen ergibt sich für jedes Gerät eine Einsatzdauer von 6.400 h.

12.2.6 Datenerfassung

Die Datenerfassung gestaltete sich schwierig, da es vor allem im Bereich der OLEDs noch keine Referenztechnologie gibt. Bei der Recherche zu dieser Studie hat sich gezeigt, dass vor allem die Datenbeschaffung im Bereich der OLED-Herstellungsmaterialien kompliziert ist. Ein Grund dafür ist, dass die Forschung im Bereich der OLEDs ständig neue und bessere Produkte und damit andere Produktzusammensetzungen hervorbringt.

Die Technik zur Herstellung der Displays befindet sich in einer ständigen Weiterentwicklung. Dies ist beispielsweise an der Bedampfungstechnik zu sehen. Diese wies noch vor einigen Jahren Ausschussraten von 95 % auf, heute liegen sie zum Teil unter 50 %. (Blochowit-Nimoth et al. 2002)

Hieraus resultiert eine Kostensenkung bei gleichzeitiger Materialeinsparung. Nichtsdestotrotz ist der Preis von OLEDs bisher noch zu hoch, um größere Displays wirtschaftlich in Serie herzustellen.

Die OLED Entwicklung verläuft langsamer als von Experten erwartet. Dies liegt daran, dass sie als Ersatztechnologie für LCD-Displays dient, aber auch diese wesentlich weiter fortgeschritten sind (Bieller et al. 2008, S.11). Daher konnten OLED-Produkte den Massenmarkt bisher nur teilweise erreichen. Dies führt aber auch dazu, dass die Hersteller der Displays ihr Wissen über die Technologie nicht publizieren (Boeffel C., FhG IAP²⁸, persönliche Mitteilung, 12. Oktober 2010), um keinen Nachteil gegenüber ihren Wettbewerbern zu haben. Aufgrund dieser Tatsachen musste für diese Technik auf eine Herstellungsanalyse verzichtet werden.

Im Bereich der LCD-Technologie sind vor allem Tantal, Molybdän und Indiumoxyd schwierig, da für sie keine Materialintensitätsdaten zur Verfügung standen. Daher wurden diese Stoffe vernachlässigt. Für die Werte in der Berechnung konnte auch bei „Feinstoffen“, „andere Kunststoffe“ und „andere Stoffe“ keine Daten angenommen werden, da die Stoffe zu unspezifisch benannt waren. Sie wurden in der Analyse ebenfalls vernachlässigt.

²⁸ Fraunhofer Institut für angewandte Polymerforschung

12.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht der MIPS von LCD und PDP zu sehen.

Tab. 36: Übersicht MIPS der Displaytechnologien LCD und PDP, mit einem Vergleich zwischen den Herstellungsmaterialien und der Nutzungsphase

Technologie	Abiotisches Material	Biotisches Material	Wasser	Luft
Materialien LCD	452 kg/m ²	0 kg/m ²	6.329 kg/m ²	84 kg/m ²
Nutzungsphase LCD	5.741 kg/m ²	75 kg/m ²	103.600 kg/m ²	935 kg/m ²
Verhältnis Material/Nutzungsphase	8%	0%	6%	9%

Materialien PDP	622 kg/m ²	0 kg/m ²	9.797 kg/m ²	115 kg/m ²
Nutzungsphase PDP	10.143 kg/m ²	132 kg/m ²	183.027 kg/m ²	1.652 kg/m ²
Verhältnis Material/Nutzungsphase	6%	0%	5%	7%

Quelle: Eigene Berechnung

Das Ergebnis zeigt die Materialaufwendungen für 1 m² Display im Vergleich zu den Aufwendungen während der gesamten Nutzungsphase. Die Zahlen belegen, dass der Einfluss der Materialien am Lebenszyklus offensichtlich sehr klein ist, vor allem im Anbetracht der Nutzungsphase. Im Vergleich zu dieser verursachen die Materialien weniger als 10 % des MIPS.

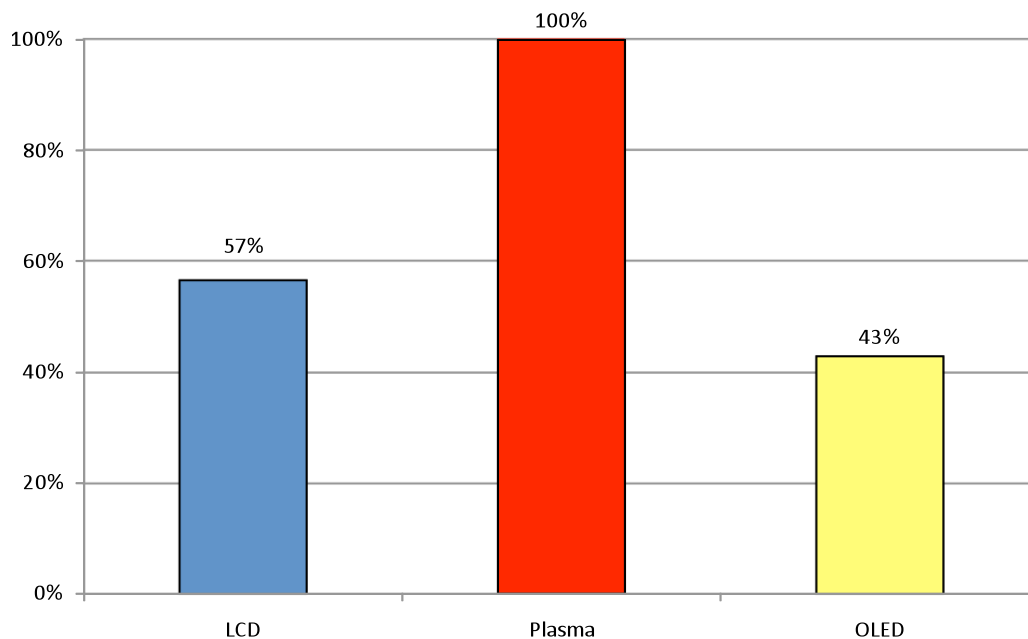
Der voraussichtliche Energiebedarf eines 60 Zoll OLED beträgt nach Abschätzung etwa 227 W/m² (eigene Berechnung auf Grundlage von (Behrendt et al. 2004, S.35)). Daraus ergeben sich folgende MIT-Werte:

Tab. 37: Übersicht MIPS der Displaytechnologie OLED

Technologie	Abiotisches Material	Biotisches Material	Wasser	Luft
Nutzungsphase OLED	4.210 kg/m ²	55 kg/m ²	75.973 kg/m ²	686 kg/m ²

Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 32: Das Verhältnis des Ressourceneinsatzes während der 5 a Nutzungsphase zwischen den drei Technologien LCD, Plasma und OLED in Abhängigkeit vom deutschen Strommix (2008), bei Vernachlässigung der Herstellungsphase



Quelle: Eigene Berechnung

Abb. 32 stellt das Verhältnis der Displaytechnologien während ihrer Nutzungsphase da. Dieses Verhältnis ist bei allen MIPS Kategorien gleich, da die einzige Variable der Strombedarf der Displays ist.

Da OLEDs zum größten Teil aus organischen Verbindungen bestehen (VDI 2002) und darüber hinaus etwa 30 % leichter sind als LCDs, ist davon auszugehen, dass der Ressourcenaufwand ihrer Materialien eher geringer ist als bei LCDs. Des Weiteren sind für ihre Herstellung weniger Schritte notwendig, daher ist an dieser Stelle ein geringerer Materialausschuss zu erwarten. (Behrendt et al. 2004, S.34f)

Tab. 36 lässt darauf schließen, dass die Materialien bei Displays im Allgemeinen einen relativ geringen Einfluss auf den Gesamtressourcenverbrauch haben. In erster Linie entscheidet die Nutzungsphase, wie hoch die Ressourcenverbräuche sind.

12.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Plasmabildschirme sind materialintensiver als LCD-Bildschirme und OLEDs. Für die Materialien von PDPs ist im Durchschnitt etwa 1,4 Mal so viel abiotisches Material, Wasser und Luft aufzuwenden wie für LCDs. Dies liegt vor allem an den notwendigen Materialmengen, welche bei PDPs auch ca. um den Faktor 1,4 höher sind. Allerdings ist die Nutzungsphase der jeweiligen Technologien entscheidender für das Gesamter-

gebnis. Bei den beschriebenen Technologien liegt der Anteil der Herstellungsphase am MIPS bei unter 10 %.

In Abb. 32 ist zu sehen, dass OLEDs während ihrer Nutzungsphase die geringste Materialintensität aufweisen, da ihr Strombedarf 14 % unter LCDs²⁹ und sogar 57 % unter PDPs liegt.

Unter der Annahme, dass sämtliche in Deutschland vorhandenen CRT Fernsehgeräte (46 Mio.) (Statistisches Bundesamt 2010) gegen neue Displays mit 37 Zoll³⁰ ausgetauscht werden, ergibt sich das nachfolgende Ressourcenpotenzial:

Tab. 38: Ressourcenverbrauch und Ressourceneffizienzpotenzial in Deutschland, wenn sämtliche CRT Monitore ersetzt werden, ohne Nutzungsphase

Technologie	Abiotisches Material	Wasser	Luft
LCD	7,81 Mio. t	109,38 Mio. t	1,45 Mio. t
PDP	10,75 Mio. t	169,32 Mio. t	1,99 Mio. t
LCD statt PDP	2,93 Mio. t	59,94 Mio. t	0,54 Mio. t

Quelle: Eigene Berechnung

Aus der Statistik geht hervor, dass große Mengen an Ressourcen alleine durch die LCD-Technologie im Vergleich zu PDP-Technologie eingespart werden können. Eine Abschätzung für OLEDs ist an dieser Stelle nicht möglich.

Ein generelles Problem ist die geringe Nutzungsdauer der IKT, die sich auch in der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen widerspiegelt. Vor allem Lifestyle-Produkte, wie Mobiltelefone, MP3-Player, digitale Fotoapparate und Notebooks, werden bereits nach wenigen Jahren durch neuere Geräte ersetzt. Dies führt zu einem hohen Schrottaufkommen, da die Recyclingquote ausbaufähig ist (Oehme 2008, F.11). Nicht recycelbare Kunststoffe sind fachgerecht zu entsorgen, da beim Verbrennen teilweise hochgiftige Substanzen entstehen und ein natürlicher Abbau unmöglich ist.

In den kommenden Jahren ist mit großen Mengen an zusätzlichem Elektroschrott zu rechnen, welcher aus dem Displaymarkt stammt. Eine Studie aus Großbritannien unterstützt diese Aussage (Cryan et al. 2010, S.10), sie geht außerdem davon aus, dass das Schrottaufkommen in den nächsten Jahren steigen wird. Hierbei spielt auch der Umstieg auf neuere, bessere Technologien (OLED, LCD) eine Rolle. Aufgrund des Preises und der Technologieentwicklung von Displays ist allerdings zu erwarten, dass ein Großteil der Substitution dem normalen Wechselzyklus folgt. Das Schrottaufkommen daher nicht überproportional zunimmt. Rebound Effekte, wie der vermehrte Einsatz von OLEDs können aufgrund ihrer Flexibilität dieses Verhältnis verändern. Es

²⁹ Dies wurde in einem E-Mail von Anke Lemke NOVALED AG bestätigt [E-Mail, Anke Lemke 20.10.2010]

³⁰ Anhand (GFU 2009) Seite 11 zeigt sich, dass der Anteil an großen Displays weiterhin zunimmt. Aktuelle sind 55 % der verkauften Displays ≥ 37 Zoll, daher wurde diese Größe als Standard angenommen.

bleibt daher offen, ob es mit Einführung der OLED-Technologie insgesamt zu einer Reduzierung des Ressourcenverbrauchs kommt.

12.5 Handlungsempfehlungen

Neue Technologien wie LCDs und PDPs haben sich bereits am Markt durchgesetzt, allerdings steigt die durchschnittliche Displaygröße jedes Jahr an (GFU 2009, S.11). Die OLED-Technologie hat sich nur in gewissen Teilsegmenten (z. B. Radiodisplays, Handydisplays) etabliert. Experten gehen aber davon aus, dass OLEDs die Zukunft gehört (Bieller et al. 2008). Es ist daher zukünftig mit einem Marktumbruch zu rechnen, sodass OLEDs größere Marktsegmente einnehmen. Dies führt nicht automatisch zu größeren Mengen an Elektroschrott, da nur ein gewisser Prozentsatz der Bevölkerung diese Technologie als Anreiz sehen wird, ihr Gerät zu tauschen.

OLEDs sind im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch und ihre Anwendbarkeit zukünftig zu bevorzugen. Ihr Preis muss hierzu allerdings weiter sinken. Die Herstellungsmaterialien verursachen nur maximal 10 % des Ressourcenbedarfs. Die Stellschrauben für den Verbrauch liegen daher in der Nutzungsphase und somit beim Strombedarf. Entscheidend ist das Nutzerverhalten und der Strommix, welche den Ressourcenbedarf entscheidend beeinflussen.

Schwierig ist daher die Tatsache, dass diese Displays ein wesentlich umfangreicheres Anwendungsspektrum haben (Bieller et al. 2008). Dies kann zu Reboundeffekten führen, da mehr Displays verbaut werden, bspw. in Kleidungsstücken. Dies kann wiederum zu einem größeren Materialverbrauch insgesamt führen. Der Energiebedarf von OLEDs ist geringer, aber bei umfangreicher Verbreiterung, kann dies zu einer Negierung des Ressourcenvorteils führen. Beispielsweise werden heute keine Displays in U-Bahndecken eingesetzt. Bei entsprechenden Preisen und einfallreichen Werbefachleuten ist dies allerdings nur eine Frage der Zeit.

Im Hinblick auf die neuen Displays und die damit verbundene neuen Materialien, ist es wichtig, Recyclingvorgaben zu schaffen (ElektroG³¹). Diese müssen dafür Sorge tragen, dass ein hoher Prozentsatz der Displays adäquat zurückgeführt wird. Diese Vorgabe sollte allen Produzenten ähnlich wie in der Automobilindustrie gemacht werden, sodass sukzessive eine bessere Rückführung der verbauten Rohstoffe erfolgt.

Eine weitere Möglichkeit wäre, besonders materialintensive Stoffe zu besteuern. Wenn dies nicht global geschieht, können einzelne Marktwirtschaften Nachteile gegenüber dem Ausland haben. Eine Besteuerung wäre ein Signal, frühzeitig nach geeigneten Substituten zu forschen.

Als Umsetzungs- und Handlungsempfehlung folgt, dass ein Umstieg auf die OLED-Technologie in einem angemessenen Zeitrahmen sinnvoll ist. Sie hat das Potenzial, den Display- und Beleuchtungsmarkt zu revolutionieren und wirkt sich material-

³¹ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten

und ressourcenschonend auf die Umwelt aus. Allerdings sollte möglichen Rebound-Effekten von Anfang an vorgegriffen werden.

12.6 Quellenverzeichnis

- Behrendt, S., Erdmann, L. (2004): Display-Märkte im Umbruch – Neuorientierung für Umweltschutzstrategien für das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Berlin: IZT
- Bieller S. (2008): European Technology: Flat Panel Displays, 6th Edition, VDMA, DFF, Frankfurt am Main, VDMA Verlag GmbH
- Blochowitz-Nimoth J., Pfeiffer M., Leo K. (2002): Flachdisplays auf der Basis aufgedampfter organischer Leuchtdioden, Vakuum in Forschung und Praxis, Nr. 14, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- BUND (2008): Stromverbrauch von TV-Geräten - Marktübersicht von 406 TV-Geräten (LCD und Plasma), Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Berlin. (online) verfügbar auf:
http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/energie/20080820_energie_stromverbrauch_tv_marktuebersicht.pdf
- Cryan J., Freegard K., Morrish L., Myles N. (2010): Demonstration of Flat Panel Display recycling technologies, Material change for a better environment, Banbury (GB), S.44.
- Dassow, R. (2001): Laserkristallisation von Silicium. (online) verfügbar auf <<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/942/pdf/arbeit.pdf>> (12.01.2010)
- EU (2005): Methodology Study Eco-design of Energy-using Products, Europäische Kommission, Brüssel
- Evans M., Ro S., Young B (2010): Blue Books - Experts' views for expert investors - Brighter, thinner, better - Why OLED will replace LCD (online) verfügbar auf:
<http://bg.panlv.net/file2/2010/03/08/f12b25c6994748ce.pdf> (25.10.2010)
- GFU (2009): Der Markt für Consumer Electronics - Deutschland 2009, Präsentation, GFU, GfK
- Gfu, GfK, BVT (2010): Consumer Electronics Marktindex Deutschland (CEMIX), Gesellschaft für Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik, Gesellschaft für Konsumforschung.
- Grundig (2010): Energie-Information Grundig LCD-TVs (online) verfügbar auf
http://www.grundig.de/fileadmin/content_images/Download_Center/Technische_Daten/pdfs/TV/Energie-Information_Grundig_LCD-TVs.pdf (26.10.2010)
- Kersten, S. (2009): IT-Handbuch für Informatiker. 4. Auflage. Bonn: Galileo Press
- May, C. (2005) TCO-Schichten für OLED-Display und Beleuchtungen. Fraunhofer Workshop 2005 (online) verfügbar auf:
<http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2005/ws2005_06_04.pdf> (24.03.2010)
- Nazeeruddin, M.K. , Klein, C. , Grätzel, M. , Zuppiroli, L. , Berner, D. (2003): „Molecular Engineering of Iridium Complexes and their Application in Organic Light-Emitting Devices” in Highly Efficient OLEDs with Phosphorent Materials. Edited by Hartmut Yersin. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag
- Oehme I. (2008): Vortrag: BMU – UBA - BITKOM Jahreskonferenz: Klimaschutz und Ressourceneffizienz 14.02.2008, Bundespresseamt Berlin (online) verfügbar auf
<http://www.dialogprozess-konsum.de/itk-konferenz/downloads/Oehme.pdf6>

Schweikle, R. (2009): Fallstudie Flachbildschirmindustrie in Innovations-strategien japanischer und deutscher Unternehmen. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler

Statistisches Bundesamt (2007): Durchschnittliche Sehdauer (Fernsehen) pro Tag nach Altersgruppen in Deutschland im Jahr 2007 (online) verfügbar auf: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1525/umfrage/durchschnittliche-fernsehdauer-pro-tag/>

Statistisches Bundesamt (2010): Wirtschaftsrechnungen - Laufende Wirtschaftsrechnungen Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern, Wiesbaden.

VDI-Technologiezentrum (2002): Der Report - Die Deutsche Agenda Optische - Technologien für das 21. Jahrhundert, VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf.

13 Ressourceneffizienzpotenziale beim Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten durch Rückgewinnung aus dem Hausmüll mit Hilfe einer RFID-Kennzeichnung der Primärprodukte

Jan Udes

Martin Grismajer (Technische Universität Berlin / Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb)

Steffen Heyer (Technische Universität Berlin / Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb)

13.1 Einleitung

Die Mengen an Elektro-/Elektronikgeräten (EAG) steigen und enthalten Wertstoffe wie Metalle, Edelmetalle und Kunststoffe. In Deutschland werden die Geräte am Ende ihrer Nutzungsphase entsprechend des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG) getrennt gesammelt und der Wiederverwendung, dem Recycling oder der Verwertung zugeführt. Viele „Mülltonnen-gängige“ EAG finden nicht den Weg in das Rücknahmesystem und werden trotz Rückgabepflicht im Hausmüll entsorgt. Ein Großteil dieser kleinen EAG wird in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) verbrannt. Die enthaltenen Wertstoffe, darunter auch seltene Metalle, wie beispielsweise Gold, gehen durch diesen Prozess der Kreislaufwirtschaft zu einem großen Teil verloren. Eine Kennzeichnung der Elektro- und Elektronikgeräte im Produktionsprozess mit passiven Radio Frequency Identification (RFID) Etiketten könnte einen automatisierten Sortierungsvorgang bei den MVA ermöglichen und eine effiziente Rückführung der Wertstoffe in den Stoffkreislauf unterstützen.

13.2 Vorgehensweise

Für EAG als Teilfraktion der durch das ElektroG erfassten Altgeräte wird grob quantifiziert, welche Ressourceneffizienzpotenziale die Erhöhung der stofflichen Verwertung durch automatisierte Aussortierung der Geräte aus dem Hausmüll und Wiederaufbereitung in einem Recyclingprozess, bei gleichzeitiger Verringerung des Anteils der Verbrennung in einer MVA, erwarten lässt. Die Analyse auf Basis des MIPS-Konzeptes (Material-Input pro Serviceeinheit) berücksichtigt einen Teil der in den Geräten und RFID-Etiketten enthaltenen Metalle, Edelmetalle und Kunststoffe. Untersucht werden die Stoffflüsse vom Eintritt der Abfalleigenschaft der Geräte bis zur Wiederverwendung, stofflichen Verwertung, Verbrennung oder Behandlung zur Deponierung (Udes 2010). Die Modellierung beinhaltet vier Teile: Zuerst erfolgt die

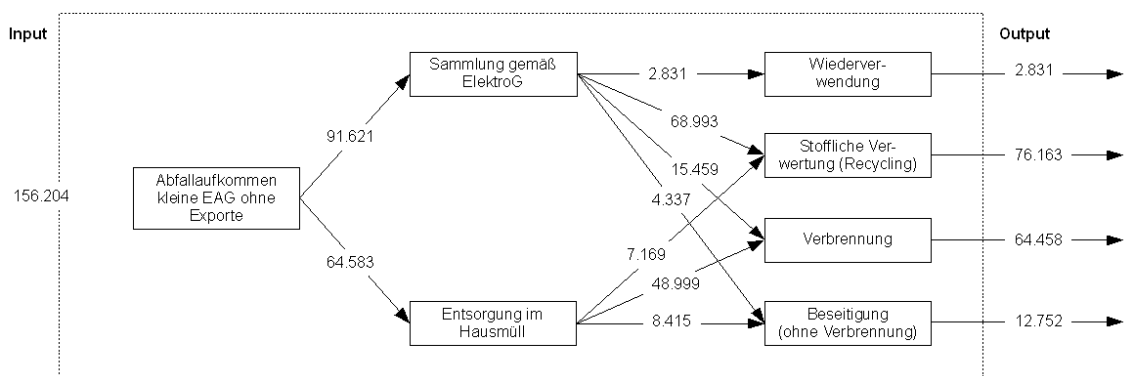
Ermittlung der Mengenaufteilung der kleinen EAG entsprechend der weiteren Behandlung (Stoffflüsse). Der zweite Teil dient der Bestimmung der Zusammensetzung der kleinen EAG und der RFID-Etiketten (Aufbau der Geräte in Abhängigkeit der Geräteart). Die Erstellung der Sachbilanzen (Input/Output) und eine Zuordnung der Stoffe in die Kategorien Gut, Übel und Neutrum erfolgen im dritten Teil (Objektkategorien vgl. Dyckhoff 1994). Nach diesen vorbereitenden Untersuchungen wird im vierten Teil die Berechnung des Material-Inputs pro Serviceeinheit (MIPS) durchgeführt. Grundlage ist das auf ein kg normierte Verhältnis zwischen den Mengen Gut Input-Seite zu Gut Output-Seite der beiden untersuchten Szenarien.

13.2.1 Untersuchte Szenarien

Es erfolgt ein Vergleich des Ressourcenverbrauchs für 1 kg Recyclat aus kleinen EAG (Ist-Zustand) mit einer Fallstudie, in der durch Nutzung von RFID ein Großteil der aus dem Hausmüll zu den MVA gelangenden kleinen EAG automatisch erkannt, aussortiert und zusätzlich dem Rücknahmesystem für EAG zugeführt wird. Beide Szenarien wurden auf Grundlage der Daten über Elektro(nik)geräte in Deutschland im Jahr 2006 nach (BMU 2008) erstellt. Daraus ergibt sich ein über die öffentlich-rechtlichen Entsorger gesammeltes EAG-Aufkommen in der Sammelgruppe 3 (entspricht den Kategorien 3 und 4 im ElektroG) in Höhe von 215 Tsd. t (inkl. Fernsehern und Monitoren mit Bildröhren, die aber aufgrund von geringer Relevanz und zukünftigem Aufkommen nicht weiter betrachtet werden).

Im Szenario „Ist-Zustand“ werden entsprechend der Daten für das Jahr 2006 knapp 92 Tsd. t kleine EAG gesammelt und davon ca. 69 Tsd. t stofflich verwertet (Abb. 33). Unter Berücksichtigung der im Rahmen der Sortieranalysen ermittelten 0,8 Gewichtsprozent EAG im Hausmüll (Chancerel 2009a) ergeben sich ca. 65 Tsd. t Informations-, Telekommunikations- und Unterhaltungselektronikgeräte im Restabfall. Mit ca. 49 Tsd. t wird der Großteil dieser kleinen EAG in einer MVA verbrannt. Für die stoffliche Verwertung resultieren ca. 76 Tsd. t und für die Verbrennung insgesamt ca. 64,5 Tsd. t. Mit knapp 3 Tsd. t wird nur ein Bruchteil der kleinen EAG wiederverwendet. Jährlich werden ca. 13 Tsd. t ohne Verbrennung beseitigt.

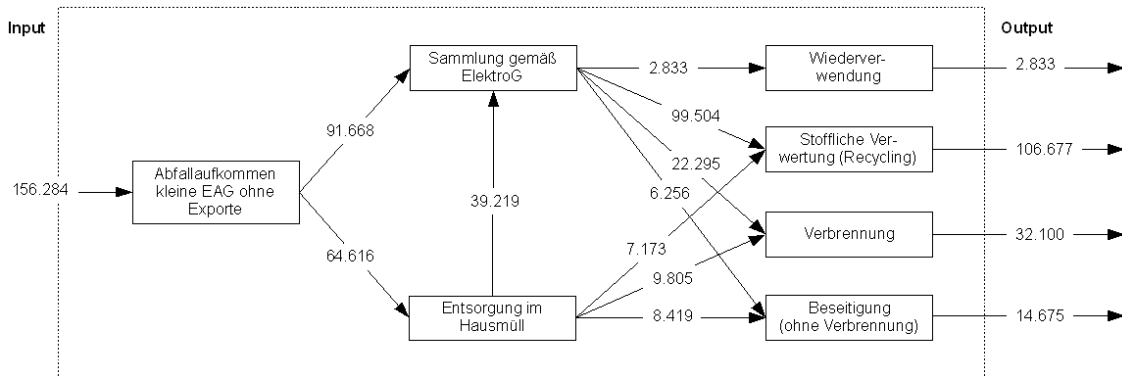
Abb. 33: Stoffflüsse für die Fraktionen Hausmüll und Sammlung im Ist-Zustand (in t pro Jahr)



Quelle: Udes 2010

In der Fallstudie verschieben sich die Mengenverhältnisse zu Gunsten der stofflichen Verwertung. Es wird unterstellt, dass 80% der im Hausmüll befindlichen und mit RFID-Etiketten gekennzeichneten EAG aussortiert werden können, das entspricht ca. 39 Tsd. t (inkl. RFID-Etiketten), begründet bei den Annahmen in Kapitel 2.3 (Abb. 34).

Abb. 34: Stoffflüsse für die Fraktionen Hausmüll und Sammlung unter Berücksichtigung der RFID-Etiketten in der Fallstudie (in Tonnen pro Jahr)



Quelle: Udes 2010

Diese Geräte werden mit identischen Quoten wie die bereits im Rücknahmesystem befindlichen Geräte weiterbehandelt. Die Mengen der Wiederverwendung ändern sich nur bedingt durch die zusätzlichen RFID-Massen, da aus dem Hausmüll aussortierte Geräte vermutlich nicht direkt wiederverwendbar sind. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich um defekte EAG bzw. gehen diese durch unvorsichtigen Umgang mit dem Hausmüll bei der Sammlung kaputt. Die Menge der Beseitigung (ohne Verbrennung) erhöht sich gegenüber dem Ist-Zustand leicht auf 14,7 Tsd. t. Die stoffliche Verwertung erhöht sich demnach signifikant auf 106,7 Tsd. t und die Menge der verbrannten kleinen EAG reduziert sich entsprechend stark auf 32,1 Tsd. t.

13.2.2 Definition der Service-Einheit

Als Serviceeinheit wird der Material-Input der Metall-, Edelmetall- und Kunststofffraktion aus kleinen EAG (Ist-Zustand) bzw. der Material-Input der Metall-, Edelmetall- und Kunststofffraktion aus kleinen EAG zuzüglich des Material-Inputs der Bestandteile der RFID-Etiketten (Fallstudie) bezogen auf 1 kg Metall-, Edelmetall- und Kunststoff-Recyclat mit der Einheit kg/kg definiert.

13.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Betrachtet werden Informationstechnik- und Telekommunikationsgeräte (Kategorie 3) und Geräte der Unterhaltungselektronik (Kategorie 4), da diese bei zukünftiger Bedeutungszunahme bereits heute einen großen Anteil der in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland ausmachen und weitestgehend Mülltonnengängig sind. Die Mengen enthalten neben kleinen EAG auch große, nicht-Mülltonnengängige Röhrenfernseher und -monitore (CRT). Diese werden aus den betrachteten Stoffflüssen herausgerechnet, da Röhrengeräte bei den Verkäufen nur noch eine un-

tergeordnete Rolle einnehmen (CEMIX 2009) und ihre Entsorgung über den Hausmüll, zumindest bei den sehr großen Geräten, unwahrscheinlich ist.

Es wird nur der Material-Input bezogen auf die Werkstoffe (von der Wiege bis zum Werkstoff) berücksichtigt. Für die identifizierten Wertstoffe der kleinen EAG, die in den stofflichen Verwertungsprozess gelangen, wird eine pauschale Rückgewinnungsquote von 50% zugrunde gelegt. Für die Rückgewinnung von Eisenmetallen und Edelstahl aus der Schlacke der Verbrennung wird diese Quote ebenfalls mit 50% angenommen. Eine Modellierung der einzelnen Rückgewinnungsprozesse findet nicht statt. Es wird angenommen, dass deren Ressourcenverbrauch durch den Energieverbrauch dominiert wird und dieser um Größenordnungen geringer ist als für die Herstellung von Werkstoffen aus Primärrohstoffen, so dass pessimistische Annahmen bzgl. der Recyclingquote den Ressourcenverbrauch durch das eigentliche Recycling-Verfahren, das nicht berücksichtigt wird, überkompensieren. Ferner werden weder Stoffflüsse zur Energiebereitstellung noch solche von Hilfsprozessen (z.B. Transporte) untersucht. Es erfolgen keine Gutschriften für die energetische Verwertung der kleinen EAG in MVA oder thermischen Verwertungsanlagen. Im Ist-Zustand werden Input- und Output-seitig die in signifikanten Mengen identifizierten Metalle (Aluminium, Edelstahl und Eisenmetalle), Edelmetalle (Silber und Gold) und Kunststoffe (ABS, PS, PP, ASA/PC und ABS/PC) betrachtet. In der Fallstudie werden Input-seitig zusätzlich die Werkstoffe der RFID-Etiketten (PP, Polyurethan und PET, Epoxy-basiertes Material, Papier sowie Nickel, Kupfer, Aluminium und Silber) einbezogen. Output-seitig werden für die RFID-Etiketten nur Kupfer, Aluminium und Silber gutgeschrieben, da davon ausgegangen wird, dass die anderen Input-Stoffe der RFID-Etiketten nicht recycelt werden. Es wird beruhend auf Tests bei der Inventur von Waren mit mobilen Lesegeräten mit Erkennungsraten von über 95% (Vorst et al. 2009) angenommen, dass 80% der aus dem Hausmüll zu den MVA gelangenden kleinen EAG automatisch erkannt und aussortiert werden können, wobei bei EAG von teilweise defekten RFID-Etiketten und ungünstigeren Lesebedingungen auszugehen ist.

13.2.4 Datenerfassung

Datengrundlage für die gesammelten Mengen (Sammlung) ist die BMU-Erläuterung zur Berichterstattung an die EU-Kommission aus dem Jahr 2006 (BMU 2008) im Zusammenhang mit der WEEE-Richtlinie 2002/96/EC bzw. dem ElektroG. Basis für die Ermittlung der in den Restabfallmengen enthaltenen Mülltonnen-gängigen EAG (Hausmüll) sind die Umwelt- und Abfallbilanzen des statistischen Bundesamts (Destatis 2009) unter Einbeziehung der Ergebnisse einer 2005 durchgeführten Sortieranalyse (Chancerel et al. 2009a). Im Jahr 2006 lag das kommunal gesammelte Restmüllaufkommen (Hausmüll) bei 14,26 Mio. Tonnen, wobei 10,82 Mio. Tonnen in MVA beseitigt bzw. der energetischen Verwertung zugeführt wurden.

Der Anteil der nicht-Mülltonnen-gängigen CRT-Geräte, der aus den Abfallmengen herausgerechnet wurde, ergibt sich aus Schätzungen zur Zusammensetzung des E-Schrotts in Europa im Jahr 2005 (UNU 2007). Die Bestandteile der RFID-Etiketten, die in der Fallstudie zusammen mit den Geräten in den Abfall gelangen, variieren erheblich

und es liegen bisher keine repräsentativen Untersuchungen vor. Es wird die Verwendung von passiven 15 x 97 mm Etiketten mit der stofflichen Zusammensetzung nach (Erdmann et al. 2009) unterstellt.

Die Geräteanzahl wird nach Verkaufszahlen (vgl. CEMIX 2009) mit Zuordnung zu den Gerätearten der Kategorien 3 und 4 des ElektroG berechnet. Die Modellierung der stofflichen Zusammensetzung der Geräte erfolgt auf Basis der Studien Bolland et al. 2010, Chancerel et al. 2009 und Chancerel et al. 2009b. Für die Erstellung der Sachbilanzen werden die stofflichen Zusammensetzungen der kleinen EAG und der RFID-Etiketten entsprechend der berechneten Mengenanteile auf die bereits ermittelten Abfallmengen übertragen.

Für die Erstellung der Sachbilanzen für die Werkstoffe der kleinen EAG und RFID-Etiketten sind die Verhältnisse zwischen den Input- und den Output-Mengen der identifizierten Wertstoffe für die beiden Szenarien von Interesse. Als Gut werden Input-seitig alle identifizierten sowie rückgewinnbaren und Output-seitig nur die sortenrein zurückgewonnenen Wertstoffmengen (Sekundärrohstoffe) aufgefasst. Die EAG-Module und -Materialien, deren Zusammensetzung nicht modelliert werden konnte, sowie die zur Wiederverwendung gelangenden kompletten EAG werden als „Neutrum“ betrachtet und somit weder Input- noch Output-seitig bei der Berechnung der Mengenverhältnisse für den Vergleich der Szenarien berücksichtigt. Gleiches gilt für bekannte Materialien, für die keine Material-Intensitäts-Werte in der verwendeten Literatur (vgl. MIPS 2003) vorhanden sind bzw. diese nicht einfach abgeschätzt werden können (z.B. für das Silizium aus den RFID-Etiketten). Output-seitige Stoffmengen, die zur Verbrennung oder weiteren Behandlung gelangen, werden als „Übel“ angesehen (Emissionen), da sie der Technosphäre und somit der Kreislaufwirtschaft verloren gehen. Sie werden vor Bildung der Input-Output-Verhältnisse für die MIPS-Berechnung herausgerechnet. Eine Ausnahme bilden die aus der Schlacke der Verbrennung sortenrein rückgewinnbaren Eisenmetalle und Edelstahl, die als Gut angesehen werden. Im Ist-Zustand verbleibt Input-seitig als Gut eine Menge in Höhe von 110.216 t (von ursprünglich 156.204 t EAG-Input) und in der Fallstudie in Höhe von 110.296 t (von ursprünglich 156.284 t EAG- und RFID-Input). Die Differenz zwischen Ist-Zustand und Fallstudie ergibt sich aus den Mengen der RFID-Etiketten.

Für alle betrachteten Metalle, Edelmetalle und Kunststoffe, die in die stoffliche Verwertung gelangen, wird eine Recyclingquote von 50% als pessimistische Annahme zugrunde gelegt. Diese Quote wird auch für die Rückgewinnung von Eisenmetallen und Edelstahl aus der Schlacke der Verbrennung angenommen. Für Edelmetalle in Mobiltelefonen werden von Unternehmen Rückgewinnungsquoten von ca. 95% angegeben (Hagelüken 2008). Bei Kunststoffen wurden in den letzten Jahren Verfahren entwickelt, die sogar das umweltgerechte Recycling von mit bromierten Flammschutzadditiven kontaminierten Sorten zulassen, so dass auch hierfür eine fast vollständige Rückgewinnung erreichbar scheint (Creacycle 2010). Auf der Output-Seite ermitteln sich die Gut-Mengen für den Ist-Zustand zu ca. 40.570 t und für die Fallstudie zu ca. 46.322 t. Die Differenzen zu den Input-Mengen der gleichen Objektkategorie sind die Emissionen aus Verlusten der Recyclingprozesse, Verbrennung und sonstiger Behandlung. Unter Abzug der aus den RFID-Etiketten recycelten Wertstoffe (ca. 18 t)

werden somit in der Fallstudie gegenüber dem Ist-Zustand 5.736 t mehr Sekundärrohstoffe aus den kleinen EAG produziert.

Für die Ermittlung der Material-Intensitäten von der Wiege bis zum Produkt (Werkstoff) für die identifizierten Input- und Output-Wertstoffe sind alle Material-Intensitäts (MIT)-Werte (MIPS 2003) entnommen, außer der eigenen Schätzung des Ressourcenverbrauchs für ASA/PC und ABS/PC. Zur MIPS-Berechnung wird das Verhältnis zwischen den Mengen Gut Input-Seite zu Gut Output-Seite gebildet und auf 1 kg normiert.

13.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

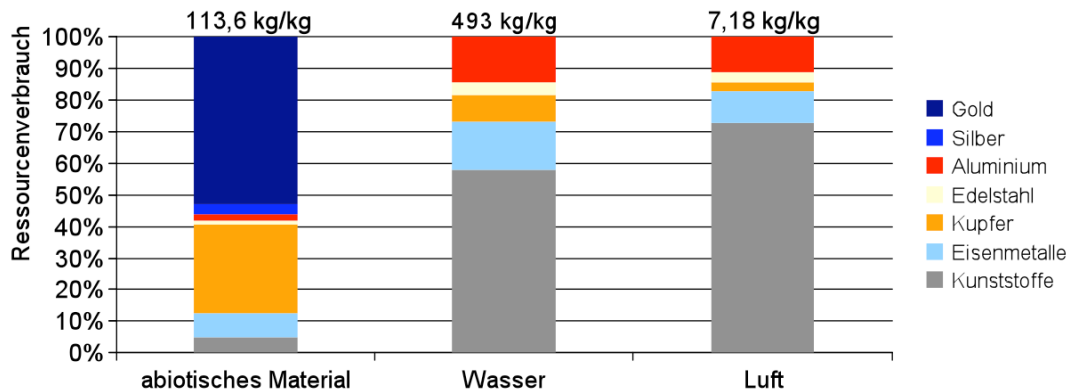
Aufgrund der Datenverfügbarkeit werden die Kategorien abiotische Materialien, Wasser und Luft berücksichtigt. Der Schritt der MIPS-Berechnung „Wiege bis zur Bahre“ entfällt teilweise, da weder Produktions- und Recycling- noch Hilfsprozesse modelliert werden. Auf der Input-Seite dominiert bei den abiotischen Materialien Gold trotz des geringen Mengenanteils in Höhe von 0,0034% den Ressourcenverbrauch mit ca. 50%. Für die Kategorien „Wasser“ und „Luft“ sind für diesen Stoff keine Werte verfügbar. Große Bedeutung in der Kategorie „abiotische Materialien“ haben auch Kupfer (ca. 26%) und Eisenmetalle (ca. 11%). Die Kategorien „Wasser“ und „Luft“ werden maßgeblich durch den Kunststoff ABS (ca. 45% für Wasser, ca. 58% für Luft) gefolgt von den Eisenmetallen (ca. 21% bzw. 14%) und Aluminium (ca. 13% bzw. 10%) bestimmt. Die höheren Gesamtmengen bei dem Ressourcenverbrauch der Fallstudie resultieren aus den zusätzlichen RFID-Mengen.

Die Gesamtmengen auf der Output-Seite differieren zwischen den Szenarien, da dank der RFID-Etiketten mehr kleine EAG stofflich verwertet werden können. Bei der Zusammensetzung des Recyclats dominieren mengenmäßig die Eisenmetalle (Ist-Zustand ca. 59% und Fallstudie ca. 52%) und Kunststoffe (ca. 29% und ca. 35%). Kupfer, Edelstahl und Aluminium bewegen sich bzgl. der Konzentration eine Zehnerpotenz darunter. Die Zusammensetzung variiert in den zwei betrachteten Szenarien, da angenommen wird, dass aus den in die MVA gelangenden kleinen EAG nur Eisenmetalle und Edelstahl zurück gewonnen werden. Darüber hinaus gelangen in der Fallstudie aus den RFID-Etiketten zusätzliche Mengen Kupfer, Aluminium und Silber in die Stoffflüsse, die teilweise wieder zurück gewonnen werden. Die mit 0,23 g pro kg Recyclat mehr als doppelt so hohe Silberkonzentration der Fallstudie erklärt sich durch den hohen Silberanteil der RFID-Etiketten.

13.3.1 Ressourcenverbrauch ohne Nutzung von RFID (Ist-Zustand)

Im Ist-Zustand wird aus ca. 2,7 kg der betrachteten Input-Materialien 1 kg Recyclat produziert. Abb. 9 zeigt den Ressourcenverbrauch, gegliedert nach dem Anteil der einzelnen Wertstoffe.

Abb. 35: Ressourcenverbrauch und Anteile der Stoffe an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den Ist-Zustand (in kg pro kg Recyclat)



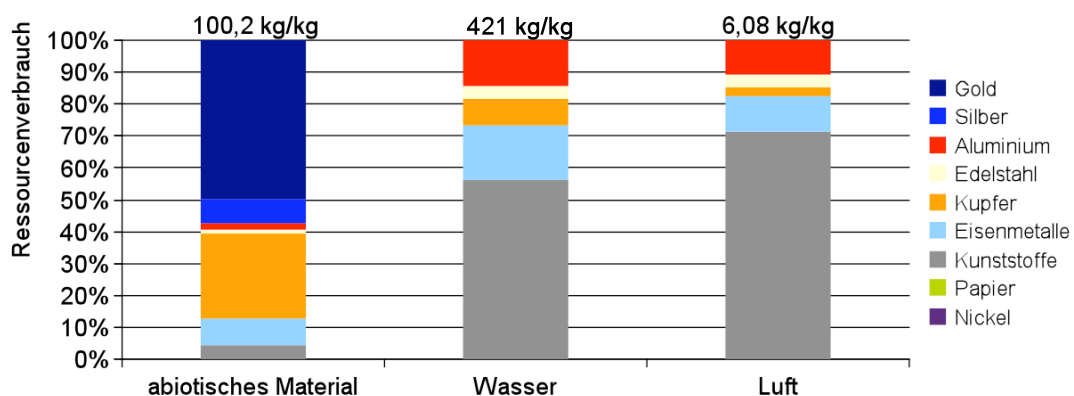
Quelle: nach Udes 2010

Gold und Silber sind zwar nur in geringen Mengen enthalten, trotzdem hat insbesondere Gold auf Grund der hohen Material-Intensität einen großen Anteil und verursacht mehr als die Hälfte des Verbrauchs an abiotischem Material. Auch Kupfer und Eisenmetalle weisen einen hohen Anteil auf. Für die beiden Kategorien Wasser und Luft ist Kunststoff (ABS) mit 49,9 bzw. 62,3% von größter Bedeutung und sollte als Sekundärrohstoff dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden.

13.3.2 Ressourcenverbrauch mit Nutzung von RFID (Fallstudie)

In der Fallstudie kommen auf 1 kg Recyclat nur noch ca. 2,4 kg Wertstoffe aus kleinen EAG. Die Mengenanteile entsprechen im Wesentlichen dem Ist-Zustand, wobei in der Kategorie abiotisches Material Silber und Kunststoffe wegen des zusätzlichen Silbers aus den RFID-Etiketten bezogen auf ihren Beitrag die Reihenfolge getauscht haben. Darüber hinaus sind auch die als Gut kategorisierten Input-Wertstoffe PP, Polyurethan, PET, Epoxy-basiertes Material, Papier und Nickel aus den RFID-Etiketten enthalten, die jedoch unter den getroffenen Annahmen nicht zurückgewonnen werden. In Abb. 36 sind diese Stoffe den Stoffgruppen zugeordnet oder zusätzlich angegeben.

Abb. 36: Ressourcenverbrauch und Anteile der Stoffe an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für die Fallstudie (in kg pro kg Recyclat)

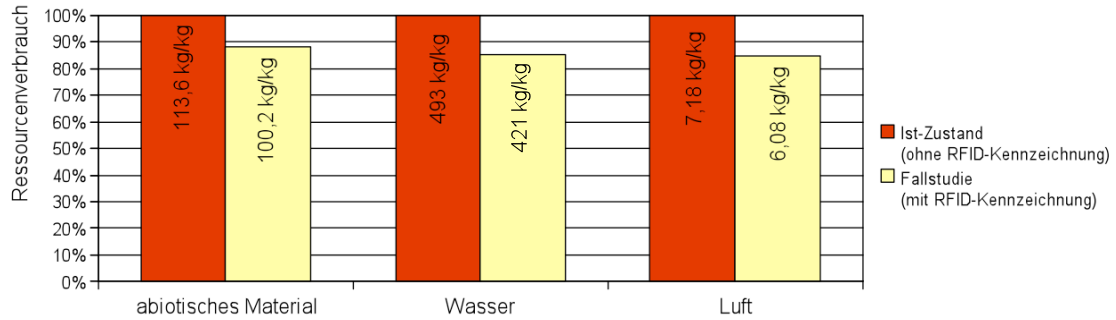


Quelle: nach Udes 2010

13.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Abb. 37 stellt einen relativen Vergleich des Ressourcenverbrauchs des Ist-Zustands mit dem der Fallstudie bezogen auf 1 kg Recyclat dar.

Abb. 37: Vergleich des Ressourcenverbrauchs von Ist-Zustand und Fallstudie (in kg pro kg Recyclat)



Quelle: nach Udes 2010

Der Verbrauch an abiotischem Material wird in der Fallstudie von 113,6 auf 100,2 kg reduziert und liegt somit um rund 13% unter dem ohne Kennzeichnung der kleinen EAG mit RFID-Etiketten. Der Wasseraufwand verringert sich um ca. 17%. Für die Kategorie Luft ergibt sich mit einer Verringerung um 18% annähernd das gleiche Bild. Tab. 39 fasst die quantitativen Ergebnisse noch einmal zusammen.

Tab. 39: Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien

Ressourcenverbrauch			
Szenario	abiotisches Material	Wasser	Luft
ohne Nutzung von RFID (Ist-Zustand)	113,6 kg/kg	493 kg/kg	7,18 kg/kg
mit Nutzung von RFID (Fallstudie)	100,2 kg/kg	421 kg/kg	6,08 kg/kg
Einsparpotenzial			
Typ des Einsparpotenzials	abiotisches Material	Wasser	Luft
absolute Einsparung (Differenz)	13,4 kg/kg	72 kg/kg	1,1 kg/kg
relative Einsparung (zu Ist-Zustand)	13,3%	17,1%	18,1%

Quelle: nach Udes 2010

In der Fallstudie wird der zusätzliche Materialaufwand durch in den RFID-Etiketten enthaltene Wertstoffe somit deutlich überkompensiert, obwohl diese mit ca. 22 Gewichts-% nur zu einem geringen Teil in den stofflichen Verwertungsprozess gelangen. Große Mengen der Input-Stoffe gehen mit den in die Verbrennung bzw. sonstige Behandlung fließenden kleinen EAG (vgl. Abb. 34) und aufgrund der mit 50% pauschal angenommenen Recyclingquote für die in die stoffliche Verwertung gelangenden Mengen sowie die in die Verbrennung gelangenden Eisenmetalle und Edelstahl verloren.

13.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Mit Blick auf den zunehmenden Ressourcenverbrauch durch Elektro-/Elektronikgeräte besteht Handlungsbedarf beim Schließen der Stoffkreisläufe. Eine verpflichtende Kennzeichnung der in Deutschland verkauften Geräte mit RFID-Etiketten kann zu einer zusätzlichen stofflichen Vewertung von über 30 Tsd. t kleiner EAG p.a. führen. Werden Input-seitig alle Wertstoffe als Gut angesehen und Output-seitig nur die zurückgewonnen Materialien, so werden in der Fallstudie gegenüber dem Ist-Zustand auf Deutschland insgesamt bezogen mit ca. 46 Tsd. t ca. 5,5 Tsd. t mehr Sekundärrohstoffe aus den kleinen EAG produziert. Es lassen sich auch seltene bzw. wertvolle Wertstoffe zurückgewinnen, die teilweise einen großen „ökologischen Rucksack“ aufweisen. Bspw. wird abgeschätzt, dass trotz der geringen Konzentration ca. 380 kg Gold zusätzlich nutzbar werden könnten. In der Kategorie abiotisches Material gehen statt 2,91 Mio. t nur 2,64 Mio. t der für die Herstellung der Primärrohstoffe aufgewandten Ressourcen „verloren“. Das Ressourceneffizienzpotenzial bezogen auf abiotisches Material kann somit zu ca. 270 Tsd. t p.a. abgeschätzt werden. Für Wasser ergibt sich ein Potenzial in Höhe von 1.333 Tsd. t, für Luft in Höhe von ca. 21 Tsd. t. Tab. 40 zeigt eine qualitative Bewertung mit weiteren Kriterien.

Tab. 40: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Ohne RFID-Kennzeichnung (Ist-Zustand)	Mit RFID-Kennzeichnung (Fallstudie)
Ressourceneinsatz	Einsatz an Primärrohstoffen ist hoch aufgrund der Vielzahl von Rohstoffen (auch vulnerable) in E-Geräten (bspw. bis zu 60 unterschiedliche Stoffe in Mobil-Telefonen, wie Tantal, Arsen, Indium und Platin). Gold hat große Bedeutung.	Einsatz an Primärrohstoffen durch Rückgewinnung von Wertstoffen geringer als im Ist-Zustand (ohne RFID).
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialien gehen durch energetische Verwertung der Technosphäre verloren (darunter Stoffe mit hohem Ressourcenverbrauch: Gold, Silber und Kupfer).	Hoch, da betrachtetes Material theoret. sortenrein zurückgew. werden kann. Zusätzl. Potenziale durch Reduktion illeg. E-Schrott-Exporte und transparentere Stoffflüsse.
Sonstige Umweltauswirkungen	Hohe Treibhausgasemissionen für die Gewinnung der Primärrohstoffe. E-Schrott enthält auch gesundheitsgefährdende Stoffe, die bei der Verwertung u.U. freigesetzt werden. Bei Verbrennung in MVA entstehen Dioxin-/Furan-Emissionen, die aber größtenteils gefiltert werden. Emissionen anderer Substanzen teilweise nicht bekannt, da über Bundes-Immissionsschutzgesetz nur geringer Anteil der Schadstoffe gemessen wird.	Reduktion der Treibhausgasemissionen, der sonstigen Emissionen (durch angepasste Recyclingverfahren bei genauerer Kenntnis der Zusammensetzung des E-Schrotts) und der Dioxin- und Furan-Emissionen, da die Menge der verbrannten kleinen EAG signifikant reduziert wird.
Realisierbarkeit	Der Ist-Zustand ist Stand der Technik und gängige Praxis.	Stand der Technik in Teilen der Logistik und in anderen Anwendungsfeldern. Zu erwartende Kosten pro Gerät nur im Cent-Bereich. Wirkt erst mittel- bis langfristig mit 5 bis 10 Jahren Verzögerung (Produktlebensdauer).
Wirtschaftliche Bedeutung	Potenziale werden verschenkt.	Einsparpotenziale mittel: mit steigenden Rohstoffpreisen Zunahme der wirtschaftlichen Bedeutung, große Chance für deutsche Unternehmen für Sicherung/Ausbau des Wettbewerbsvorteils im Bereich Cleantech. Risiko des Wegfalls von Einkommensmöglichkeiten im informellen Recyclingsektor.
Kommunizierbarkeit	Thema wird bisher öffentlich kaum diskutiert, angrenzende Themen (z.B. E-Schrott-Export) bereits im Fokus von NGO.	Verbraucher ist kaum tangiert. Risiko eines indirekten Rebound-Effektes bei offensiver Kommunikation durch Sinken der Bereitschaft zur getrennten Sammlung.
Übertragbarkeit	–	Synergien wichtig: Kenntnis der E-Schrott-Zusammensetzung / Identifikation ermöglicht angepasste Recyclingverfahren. Übertragung der Kennzeichnung auf andere Produkte könnte weitere Potenziale erschließen.

Quelle: Udes 2010

Ressourceneffizienzpotenziale können mit Hilfe dieser Technologie nur mittel- bis langfristig erschlossen werden, da nach Kennzeichnung der Primärprodukte durch die Nutzungsphase ca. fünf bis zehn Jahre vergehen, bis die Recyclingwirtschaft von der Maßnahme profitiert. Allerdings sind weitere positive Auswirkungen zu erwarten. Vermutet wird bspw. eine „verbesserte“ Recyclingrate für die stoffliche Verwertung auf Grund der durch die Kennzeichnung der Geräte möglichen automatisierten Sortierung auch bei Erstbehandlungsanlagen und in nachgelagerten Prozessen, da Gerätearten einfacher getrennt und einem differenzierteren Recyclingprozess zugeführt werden könnten. Zukünftig sind die Ansätze zur flächendeckenden Einführung einer Wertstofftonne zu beachten, die zu Veränderungen der betrachteten Stoffströmen und damit des im Fallbeispiel abgeschätzten Ressourceneffizienzpotenzials führen kann.

Es werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet: Ein nationaler Alleingang bei der Einführung einer Kennzeichnungspflicht erscheint auf Grund globaler Wertschöpfungsketten schwierig. Eine breitere Einführung müsste durch unterschiedliche Akteure (EU, national usw.) und Ressorts (Wirtschaft, Umwelt usw.) koordiniert werden. Darüber hinaus bestehen in Deutschland u.U. bereits Überkapazitäten in MVA, die zu Interessenkonflikten führen könnten und die erreichten Behandlungs-, Verwertungs-, Recycling- und Wiederverwendungsquoten werden transparenter. Nichtsdestotrotz sollte der Zugriff auf Ressourcen in Form von Sekundärrohstoffen gewährleistet und weiter ausgebaut werden. Für die Hersteller beinhaltet die Erhöhung der Transparenz das Risiko einer leichteren und somit stärkeren Kontrolle der gesetzlich übertragenen Verantwortung für ihre Produkte. Es entstehen Kosten für zusätzliche Prozesse, wobei ggf. Synergien genutzt werden können, da eine Kennzeichnung von Produkten mit RFID-Etiketten bereits integraler Bestandteil einiger Prozesse ist (z.B. Logistik, Warensicherung). Durch geschickte Vermarktung von Umweltschutzaktivitäten ergeben sich Profilierungschancen, da viele Verbraucher in Bezug auf nachhaltigeren Konsum sensibilisiert sind. Geschäftsmodelle könnten durch eine eindeutige und schnelle Identifizierung der Geräte effizienter umgesetzt werden (z.B. „Nutzen statt Besitzen“). Darüber hinaus könnte das Abrechnungs- und Meldesystem für EAG effizienter gestaltet werden. Nicht zuletzt stellt die Kennzeichnung eine einfache Möglichkeit zur Sicherung von „eigenen“ Ressourcen in Form von potentiellen Sekundärrohstoffen dar. Verbraucher stehen dem Einsatz von RFID-Etiketten in anderen Anwendungsfeldern aufgrund von Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes teilweise kritisch gegenüber. Hier kommt es darauf an, wie die Technologie genutzt wird. Solange keine personenbezogenen Daten erfasst werden, ist bei entsprechender Aufklärung mit nur geringen Widerständen zu rechnen. Durch die erhöhten stofflichen Verwertungsquoten könnte jeder Verbraucher von einer Verbesserung der Qualität der Umwelt profitieren. Die Forschung könnte insbesondere durch eine erleichterte Datenbeschaffung mit der Kennzeichnung der kleinen EAG bei gleichzeitiger Einführung einer Hersteller-übergreifenden Datenbank mit Angaben bspw. zu der stofflichen Zusammensetzung der Produkte profitieren. Derartige Informationen könnten eine gewisse Zeit nach der Markteinführung des jeweiligen Produktes zur Verfügung gestellt werden. Weitergehender Untersuchungsbedarf besteht insbesondere bzgl. einer Nachhaltigkeitsbewertung der Technologie.

Bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse ist die Daten- und Informationsausgangslage kritisch zu betrachten, es waren zahlreiche Vereinfachungen erforderlich. Es werden jedoch im Sinne der Effizienzpotenziale pessimistische Annahmen getroffen. So wird ein Großteil der Mengen an kleinen EAG im Modell bei der stofflichen Verwertung nicht berücksichtigt. Zu hinterfragen sind bspw. die Unsicherheiten bzgl. des Meldeverfahrens, aus dem die gesammelten Mengen abgeleitet wurden, der Anteil der EAG im Hausmüll, die Zusammensetzung von EAG, die Ressourceneffizienzrelevanz weiterer aufgrund von Datenmangel nicht betrachteter Stoffe, die regionale Gültigkeit von MIT-Werten im MIPS-Konzept (z.B. wegen der Herkunft von Stoffen, lokal unterschiedlichen Energie-Mixes oder unterschiedlicher Prozesse) sowie fehlende oder abgeschätzte MIT-Werte (z.B. für Gold und Silber). Empfohlen wird außerdem die Untersuchung hinsichtlich Schadstoff- und THG-Emissionen. Trotz der Vielzahl an Vereinfachungen und Datenunsicherheiten erscheint die Größenordnung der Ressourceneffizienzpotenziale plausibel. Es besteht jedoch weiterer Untersuchungsbedarf, da bisher noch nicht ausreichende Kenntnisse über die wahren Stoffflüsse und ihre Wirkungen vorliegen. Insbesondere im Zusammenhang mit einer potenziellen Nachhaltigkeitsbewertung der Technologie gibt es eine große Erkenntnislücke, da ökologische Aspekte durch das MIPS-Konzept nur Input-seitig und in ausgewählten Kategorien abgebildet werden sowie eine systematische Wirkungsabschätzung in der ökonomischen oder sozialen Dimension nicht erfolgt.

Quellenverzeichnis

- Bolland, T. Chancerel, P und Rotter, V.S. (2010): Stand der Erstbehandlung für Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland und Auswirkung auf die Rückgewinnung von Edelmetallen, Recycling und Rohstoffe, Band 3, Hrsg. Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann, TK Verlag, Nietwerder, S. 625-639.
- BMU (2008): „BMU-Erläuterungen zu der Berichterstattung an die EU-Kommission“, Hrsg. Bundesumweltministerium, Berlin, 05.09.2008.
- CEMIX (2010): Consumer Electronics Marktindex Deutschland – Januar bis Dezember 2009, Hrsg. Gesellschaft für Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik (gfu) mbh, Frankfurt, http://www.gfu.de/srv/easyedit/home/sl_1264763579828/link01/de_CEMIXQ1-Q3-2009_1.pdf, (Zugriff am 01.05.2010).
- Chancerel, P. et al. (2009): „Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment“, Journal of Industrial Ecology, Volume 13, Number 5, S. 791-810.
- Chancerel, P. und Rotter, V. S. (2009): Gold in der Tonne, Müllmagazin 1/2009, S. 18 bis 22, Rhombos-Verlag Bernhard Reiser, Berlin, 2009a
- Chancerel, P. und Rotter, V. S. (2009): Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment, Waste Management Volume 29, Issue 8, August 2009, S. 2336-2352.
- Creacycle GmbH. <http://www.creacycle.de>, Zugriff am 01.05.2010
- Destatis (2009): „Abfallbilanzen 1999-2007 – Grafiken“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Dyckhoff, H. (1994): „Betriebliche Produktion“, 2. Auflage. Springer, Berlin.

- Erdmann, L.; Hilty, L. (2009): Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung – Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung, Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, <http://www.umweltbundesamt.de>, Zugriff am 15.01.2010
- Hagelüken, C (2008): Mining our Computers, Vortragsfolien der Firma Umicore bei Electronic Goes Green 2008+, Berlin.
- MIPS. Materialintensity of materials, Hrsg. Wuppertal Institut, Version 2, Wuppertal, http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf, 28.10.2003, Zugriff am 01.05.2010
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Udes, J (2010): Ressourceneffizienzpotenziale beim Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten durch Rückgewinnung aus dem Hausmüll mit Hilfe einer RFID-Kennzeichnung der Primärprodukte. Studentische Arbeit, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb.
- UNU (2007): „2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) - Final Report“, Hrsg. United Nations University, Bonn.
- Vorst, P. und Bohlmann, K. (2009): Fortlaufende Inventur mit RFID und mobilen Systemen, Vortragsfolien zweiter AmbiSense-Workshop, Tübingen.

14 Ressourceneffizienzpotenziale in der Lebensmittelproduktion an den Beispielen Obst, Gemüse und Fisch

Almuth Eberhard (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)

Melanie Lukas (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)

Lene Stöwer (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)

Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)

Michael Lettenmeier (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

Prof. Dr. rer. pol. Petra Teitscheid (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)

14.1 Einleitung

Die Entnahme und Nutzung von Ressourcen, die damit verbundenen Emissionen sowie die Entsorgung von Abfällen bringen nicht nur ökologische, sondern zunehmend auch soziale und ökonomische Probleme mit sich. Am Beispiel des Ressourcenverbrauchs nach Bedarfsebenen in Deutschland zeigt sich, dass der Anteil der Ernährung bei ca. 20 % liegt (Bringezu / Schütz 2001). Aufgrund des großen Anteils lassen sich erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der sehr unterschiedlichen Wertschöpfungsketten von Nahrungsmittelprodukten erwarten, sowohl im Bereich der Produktion als auch dem Konsum (vgl. Wiegmann 2005). Analysen zur Ressourceneffizienz von Nahrungsmittelprodukten liegen bislang nur sehr eingeschränkt vor (vgl. Kaiser et al. 2010, Kauppinen et al. 2008, Mancini et al. 2010). Vor diesem Hintergrund wurden in dieser Arbeit einige offene Teilbereiche beispielhaft analysiert.

14.2 Vorgehensweise

14.2.1 Untersuchte Produkte

Gegenstand der Arbeit waren Potenziale der Ressourceneffizienzsteigerung von ausgewählten Nahrungsmitteln. Die Auswahl der Produktgruppen fand nach zwei grundlegenden Kriterien statt. Im ersten Schritt sollten Produktgruppen untersucht werden, zu denen es noch keine bzw. wenige Informationen zum Ressourcenverbrauch gibt, die aber zugleich relevant für den Gesamtverbrauch an Lebensmitteln sind. Auf dieser Basis wurde die in dieser Arbeit betrachteten Bereiche Fisch, Obst und Gemüse ausgewählt. Nach dieser ersten Vorauswahl wurde das Konsummuster der entsprechenden Lebensmittelgruppen in Deutschland in Betracht gezogen und solche Lebensmittel als Fallbeispiele untersucht, die einen mengenmäßig ausschlaggebenden Anteil am deutschen Konsum haben,

14.2.2 Definition der Service-Einheit

In dieser Ausarbeitung wurde als Service-Einheit 1 kg des entsprechenden verzehrfähigen Lebensmittels im Endprodukt gewählt: ein durchschnittliches Fisch-Produkt mit 1kg verzehrfähigem Fisch im Endprodukt, 1kg unverarbeitetes Obst und 1kg Tomate (ohne Stängel).

14.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Für die Analysen wurden die Massen der Inputs sowie die Energieaufwendungen vom Anbau des Produktes bis zum Endkunden erfasst. Die Systemgrenze bis zum verkauften Produkt wurde gezogen, um den Untersuchungsrahmen vergleichbar zu halten.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Infrastruktur wurde berücksichtigt, wenn Daten vorhanden waren, z.B. zum Stahlbau der Fischereischiffe oder zur Infrastruktur des Kühlhauses im Szenario Äpfel oder die Gewächshäuser in den Szenarien der Tomaten.
- Für die Herstellung der Produktions- und Landmaschinen ist zwar teilweise ein hoher Materialaufwand nötig, doch dieser wirkt sich pro kg des betrachteten Produktes in der Regel kaum aus (vgl. Kaiser et al. 2010), deshalb wurden diese vorgelagerten Produktionsstufen nicht berücksichtigt.
- Um einen vergleichbaren Rahmen zu schaffen, wurden für alle Produkte der gleiche innerdeutsche Transportweg vom Zwischenlager zum Großhandel (420km, mit 8t-LKW) (Frosta 2010) und weiter zum Einzelhandel (100km, mit 8t-LKW) bis hin zum Verbraucher (Verbraucherfahrt 5km, mit PKW) angenommen. Dabei wird der Materialverbrauch der Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt.
- Die in der Produktion entstandenen Ausschüsse, wie z.B. Ernteauffälle, Transportschäden oder Lagerverluste, verursachen zusätzliche Materialintensitäten. Für eine vollständige Berücksichtigung aller Produktionsausschüsse konnten allerdings keine Daten in ausreichender Qualität ermittelt werden. Daher wurden Produktionsausschüsse nicht berücksichtigt. Dies ist konform mit Kaiser et al. (2010) und Kauppinen et al. (2008).
- Zudem gibt es keine validen Daten zu Anteilen von Lebensmitteln in den Haushaltsabfällen in Deutschland. Entsprechend konnten keine Aussagen zu Abfallprodukten im Hausmüll getätigt werden.
- Neben dem Anbau bzw. Fischfang wurden Verarbeitungsprozesse und weitere Schritte inkl. Transportwege bis zum Konsumenten analysiert und betrachtet. Die vorgelagerten Prozesse Jungpflanzen- und Saatgutproduktion wurden nicht berücksichtigt.
- Die Betrachtung des Konsums von Lebensmitteln selbst und der damit einhergehende weitere Ressourcenaufwand für die Lagerung, Zubereitung und Entsorgung wurden nicht betrachtet.

14.2.4 Datenerfassung

Im ersten Schritt wurde die aktuelle Literatur zu Analysemethoden von Ressourcenverbrauch oder Umweltauswirkungen von Produkten speziell im Lebensmittelbereich recherchiert und ausgewertet. Zur Erhebung der Sachbilanzdaten wurden sowohl Ökobilanzen/ Energiebilanzen als auch Fachbücher und Datensammlungen zum Gartenbau und Fischfang herangezogen. Da eine reine Literaturrecherche in einigen Fällen nicht ausreichend war, wurden ebenfalls Experteninterviews durchgeführt. Durch den Mangel an wissenschaftlichen Studien mussten zum Teil auch Primärdaten erhoben werden. Da dieses dem Projektteam selbst im Rahmen der Untersuchung nicht möglich war, wurden Verbrauchsdaten bei Experten oder Produzenten telefonisch oder per Email erfragt.

Insgesamt ist die Datengrundlage zur Darstellung der Prozesse und Berechnung der Material- und Ressourcenverbräuche an vielen Stellen unvollständig. Es existieren nur wenige Ökobilanzen oder Energiebilanzen zu den verschiedenen Produkten, und diese beziehen sich oft auf spezielle Szenarien und sind dann nur schwer verallgemeinerbar. Es gab wenig konkrete Auskünfte von Produzenten und Experten/-innen über Verbrauchsdaten, da die erwünschten Daten häufig nicht erhoben werden, wenn in diesen Bereichen keine Kosten entstehen (z.B. durch Bodenbewegungen). Vor diesem Hintergrund können die nachfolgend dargestellten Werte als eine erste konservative Abschätzung betrachtet werden.

14.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus den in der Literaturrecherche und aus Experteninterviews ermittelten Basisdaten wurde nach dem MIPS-Konzept der Ressourcenverbrauch für die jeweiligen Produktgruppen berechnet.

14.3.1 Ressourcenverbrauch der Lebensmittelgruppe Fisch

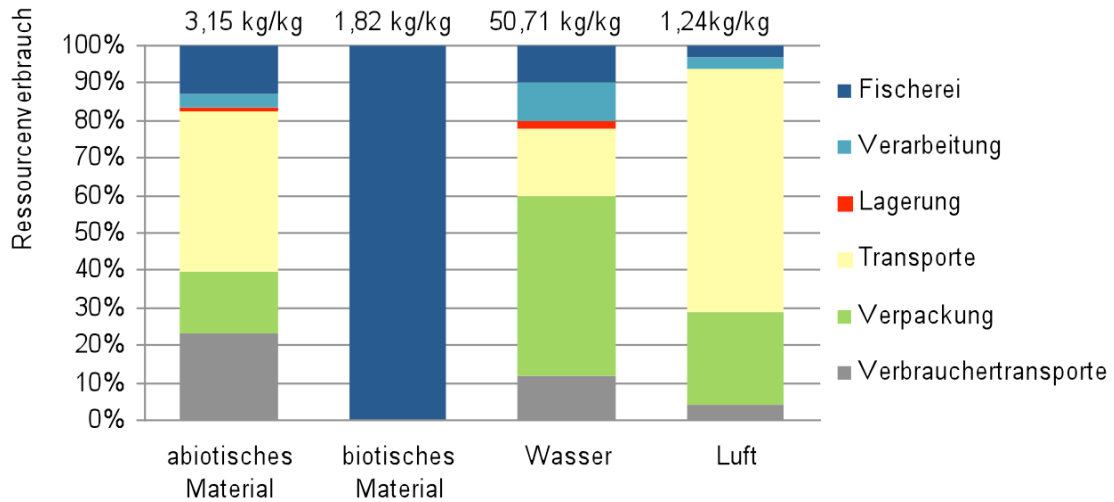
In der betrachteten Lebensmittelgruppe Fisch wurden verschiedenste Fischarten, sowie Verarbeitungsschritte untersucht. 1,28 Mt Fisch- und Fischereierzeugnisse wurden im Jahr 2008 in der Bundesrepublik Deutschland gegessen. Als Fallbeispiele wurden Fischarten ausgewählt, die in Deutschland einen großen mengenmäßigen Anteil am durchschnittlichen Konsum haben (FIZ 2009, FAO 2006): Alaska Seelachs (24,7%) Hering (20,8%), Lachs (11,1%), Thunfisch (10,2%) und Kabeljau (2,7%). Als wichtigste Verarbeitungstechniken wurden die Verarbeitung zu Tiefkühl-Erzeugnissen (z.B. Tiefkühl-Filet Alaska Seelachs), die direkte Verarbeitung zu Fischfilet bzw. die Verarbeitung zu Filets in Dosen (z.B. Thunfisch in Dosen) betrachtet.

Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen die Szenarien „Fang und Verarbeitung von Alaska Seelachs zu tiefgekühlten Filet“ (Abbildung 1), „Fang und Direkt-Verarbeitung von Hering zu Heringsfilet“ (Abbildung 2) und „Fang und Verarbeitung von Thunfisch zu Thunfischfilet in Dosen“ (Abbildung 3) dargestellt. Desweiteren wird ein Szenario abgebildet, in dem beispielhaft berechnet wurde, welchen Einfluss die Fischerei auf den Meeresboden hat. Deshalb sind in dem Beispiel „Fang und Verarbei-

tung von Kabeljau zu tiefgekühltem Filet“ (Abbildung 4) Bodenbewegungen zusätzlich zu den vier anderen Kategorien aufgeführt.

In Abb. 38 wird der Ressourcenverbrauch eines tiefgekühlten Seelachs-Filets dargestellt. Der Fisch wird in den Küstenabschnitten vor Alaska gefangen, direkt in Alaska verarbeitet und tiefgekühlt, um dann nach Deutschland per Schiff importiert zu werden. Innerhalb Deutschlands wird das Produkt per LKW weitertransportiert.

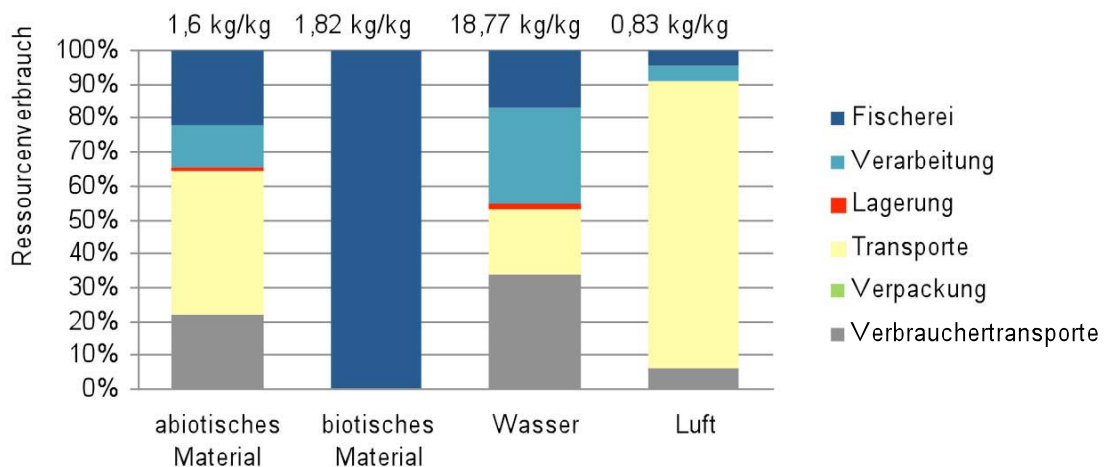
Abb. 38: Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Alaska Seelachs zu tiefgekühlten Filet



Quelle: Lukas 2010

In Abb. 39 wird der Ressourcenverbrauch eines Heringsfilets abgebildet. Der Hering, in Deutschland gefangen und angelandet, wird direkt weiterverarbeitet und danach innerhalb Deutschlands transportiert. Dabei ist zu beachten, dass dieser Fisch im Gegensatz zu den anderen Szenarien, anstatt 30 Tage nur 3-4 Tage gelagert wird.

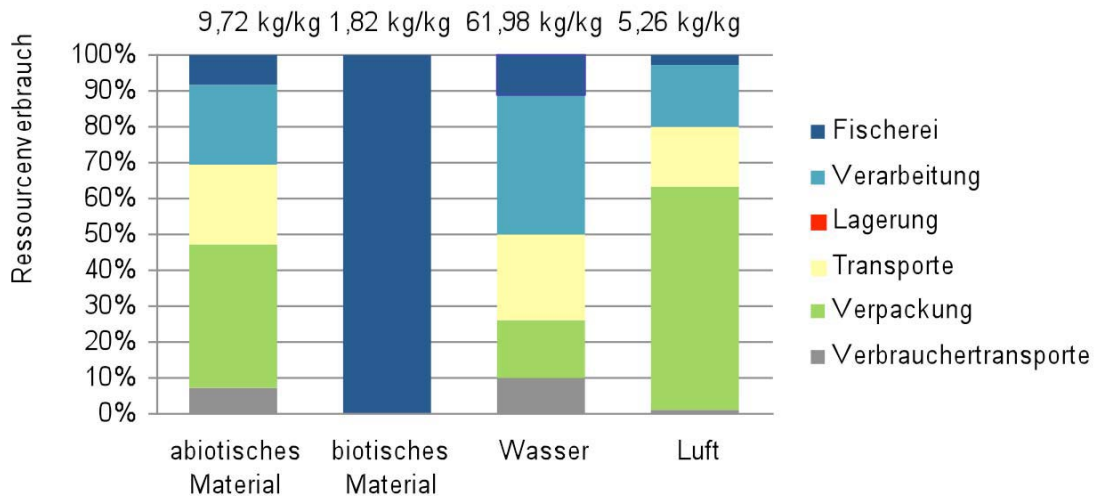
Abb. 39: Ressourcenverbrauch für Fang und Direkt-Verarbeitung von Hering zu Filet



Quelle: Lukas 2010

In Abb. 40 wird der Ressourcenverbrauch eines verzehrsfertigen Thunfisch-Filets dargestellt. Der Fisch wird in Spanien gefangen und angelandet sowie direkt weiterverarbeitet, um dann mit dem LKW nach Deutschland importiert zu werden. Innerhalb Deutschlands erfolgt zusätzlich ein Transport mit dem LKW (Hospido et al. 2006, Hospido/Tydmers 2005).

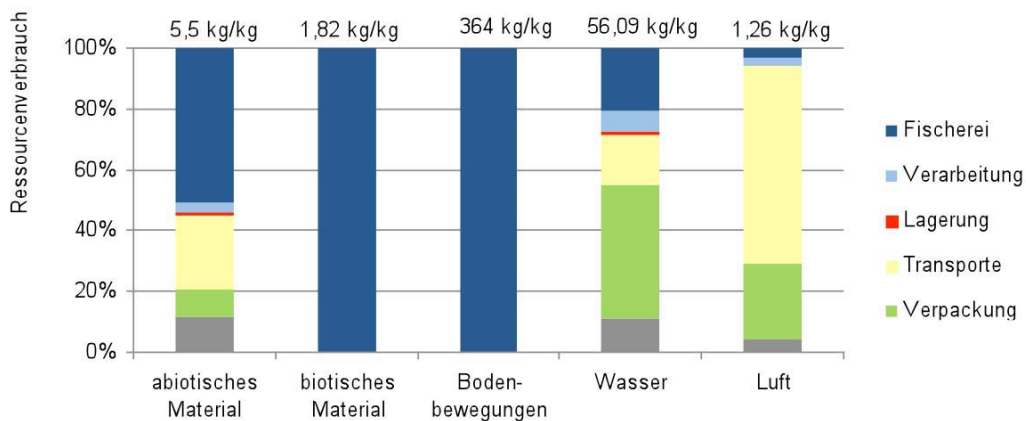
Abb. 40: Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Thunfisch zu Filet in Dosen



Quelle: Lukas 2010

In Abb. 41 wird der Ressourcenverbrauch eines tiefgekühlten Kabeljau dargestellt. Dabei wurden, vergleichend zu Ziegler et al. 2002 (ergänzend Pelletier et al. 2007), die Bodenbewegungen berechnet. Der Kabeljau wird in den Küsten vor Norwegen gefangen und wird direkt auf dem Fisch verarbeitet und tiefgekühlt. Der Import erfolgt wieder per LKW.

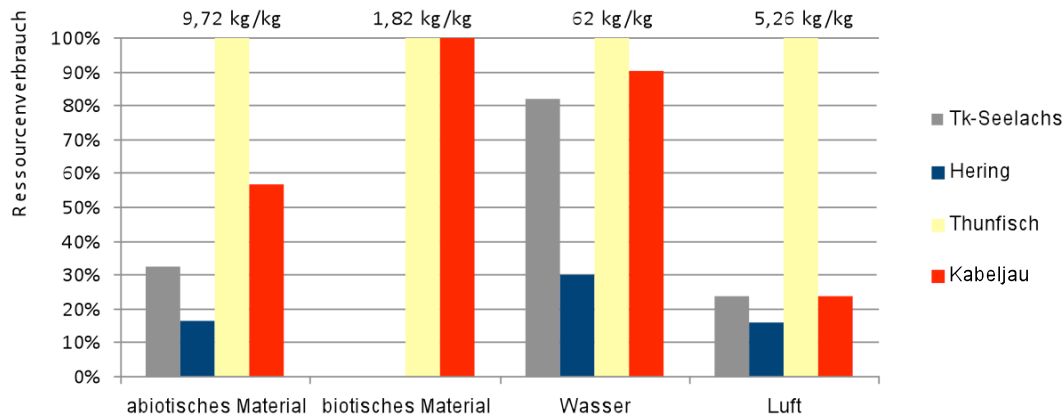
Abb. 41: Ressourcenverbrauch für Fang und Verarbeitung von Kabeljau zu tiefgekühltem Filet



Quelle: Lukas 2010

In Abb. 42 ist ein Vergleich der Ressourcenverbräuche für die untersuchten Fallbeispiele dargestellt. Die Bereitstellung des Thunfisches hat dabei den höchsten Ressourcenverbrauch in allen Kategorien. Biotischer Materialverbrauch fällt nur bei Thunfisch und Kabeljau an.

Abb. 42: Vergleich des Ressourcenverbrauchs für die untersuchten Fallbeispiele



Quelle: eigene auf Basis Lukas 2010

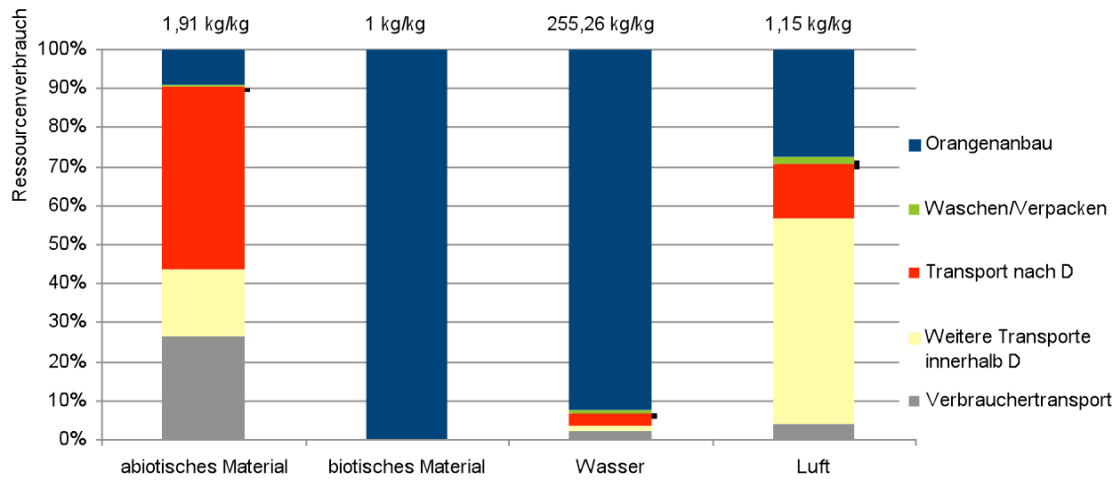
14.3.2 Ressourcenverbrauch der Lebensmittelgruppe Obst

In der Lebensmittelgruppe Obst wurden Orangen, Erdbeeren, Bananen und Äpfel aus verschiedenen Anbauweisen betrachtet. Äpfel, Bananen und Orangen sind die am häufigsten eingekauften Frischobstsorten in Deutschland. Erdbeeren spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, da sie zu den in Deutschland produzierten Hauptobstsorten gehören. Somit wurden diese vier Obstsorten für die Arbeit ausgewählt.

Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen die Szenarien „Orangen“ (Abb. 43), „Erdbeeren“ (s. Abb. 44), „Bananen“ (Abb. 45) und „Äpfel“ (Abb. 46) dargestellt. Angaben zu Bodenbewegungen waren nur in den Szenarien „Erdbeeren“ und „Bananen“ verfügbar.

In Abbildung 6 ist das Produkt „frische Orangen“ (Sorte Navelina) aus integrierter Produktion vom Anbau über das Waschen/Verpacken bis zum Transport zum Endverbraucher dargestellt. Die untersuchten Orangen werden in Spanien (València) produziert und verpackt, mit dem LKW nach Achern transportiert und von dort aus in den Großhandel und anschließend in den Einzelhandel transportiert (Sanjuán et al. 2005).

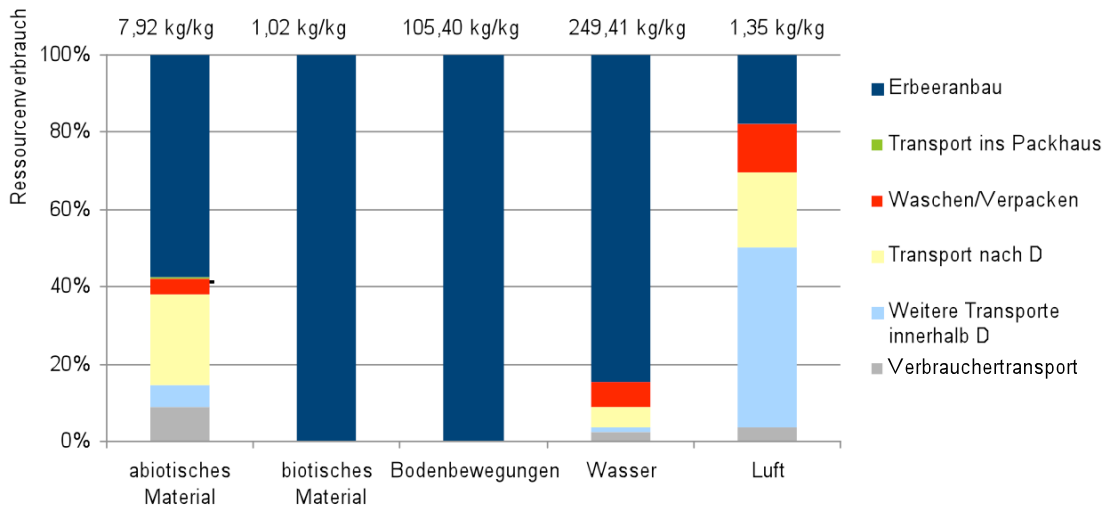
Abb. 43: Ressourcenverbrauch am Beispiel Orangen aus Spanien³²



Quelle: Stöwer 2010

Abbildung 7 zeigt spanische Erdbeeren (Sorte Best Alliance) aus konventionellem Anbau. Die Untersuchung betrachtet den Transport der Setzlinge in Segovia über den Anbau der Erdbeeren auf der Erdbeerefarm in Huelva und die Verpackung bis zum Transport zum Konsumenten (REWE 2009).

Abb. 44: Ressourcenverbrauch für Erdbeeren aus konventionellem Anbau in Spanien

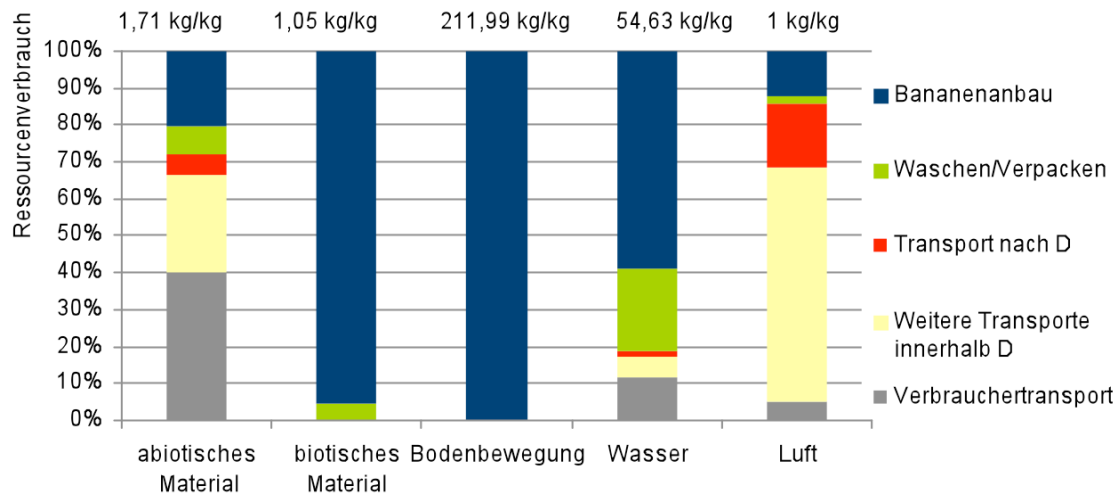


Quelle: Stöwer 2010

Auf Abbildung 8 ist das Szenario Exportbananen aus Costa Rica aus konventionellem Anbau dargestellt. Die Untersuchung betrachtet den Bananenanbau auf der Plantage, die Verpackung der Bananen sowie den Transport der Bananen bis zum Konsumenten. Auch der Transport der Pestizide wurde in die Berechnungen mit aufgenommen (Giljum 1999).

³² Zum Materialinput Bodenbewegungen waren keine Daten vorhanden.

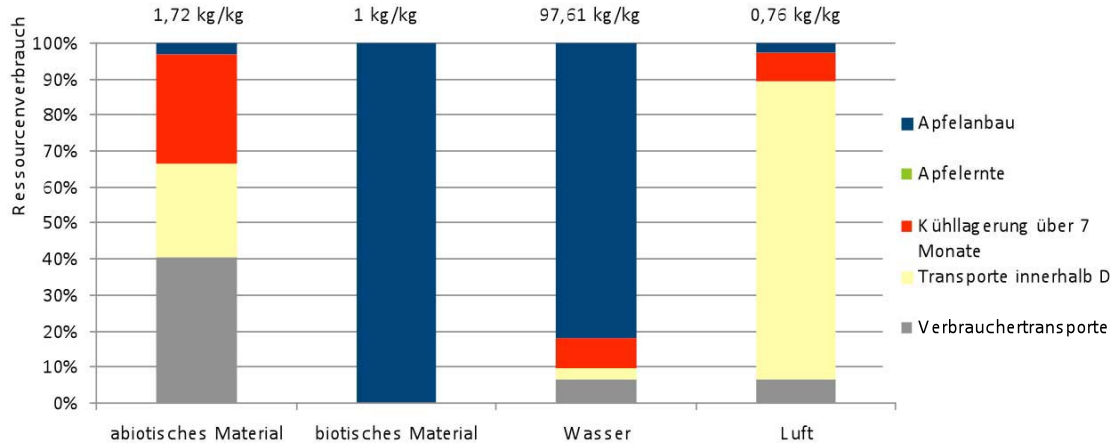
Abb. 45: Ressourcenverbrauch für Bananen aus konventionellem Anbau in Costa Rica



Quelle: Stöwer 2010

Abbildung 9 zeigt den Ressourcenverbrauch für Äpfel (Boskoop) aus integrierter Produktion in Deutschland (Obstbauregion um Hamburg). Neben der Produktion werden auch die Kühlagerung (7 Monate) sowie die Infrastruktur des Kühllagers und der Transport bis zum Endverbraucher miteinbezogen (Geier et al. 2001).

Abb. 46: Ressourcenverbrauch für Äpfel aus integrierter Produktion in Deutschland



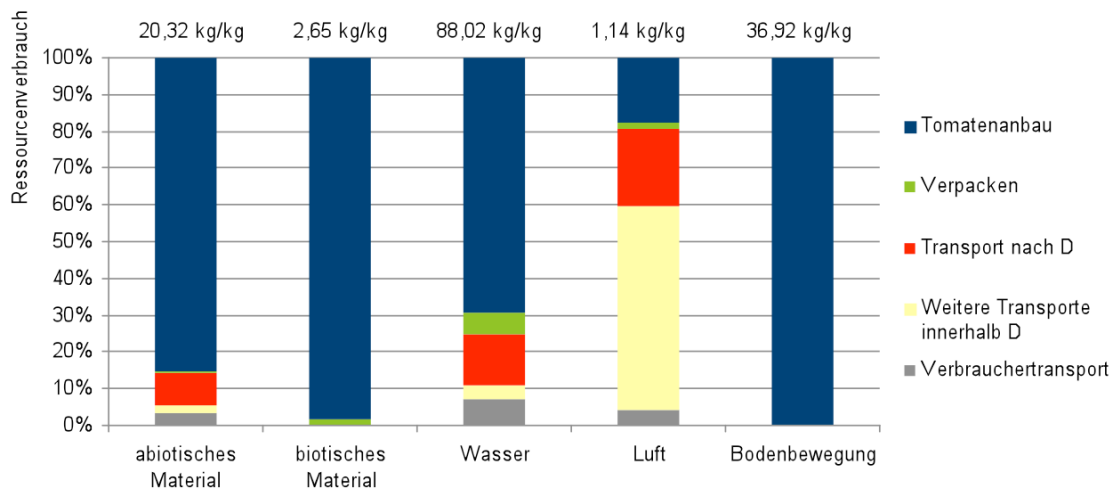
Quelle: Stöwer 2010

14.3.3 Ressourcenverbrauch der Lebensmittelgruppe Gemüse

Die Tomate stellt für den Konsum weltweit, aber auch in Deutschland die wichtigste Gemüseart dar. Ein Großteil für Deutschland wird dabei aus dem europäischen Ausland importiert. Im Rahmen der Untersuchung wurden daher verschiedene Anbauweisen in Spanien, Italien und den Niederlanden – den wichtigsten Erzeugerländern für den europäischen Markt – betrachtet. Für den Anbau und die Verarbeitung von Tomaten ist die Unterscheidung zwischen dem geschützten Anbau (unter Glas oder Folie) und dem Anbau im Freiland von Bedeutung.

Tomaten aus dem geschützten Anbau werden dabei überwiegend als Frischware, die Tomaten aus dem Freilandanbau vorwiegend als verarbeitete Tomate vermarktet. In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der untersuchten Szenarien dargestellt. In Abb. 47 wird der Ressourcenverbrauch des konventionellen Anbaus von frischen Tomaten im Gewächshaus in der spanischen Region Almeria dargestellt. Neben der Produktion wurde in diesem Szenario sowohl die Verpackung als auch der Transport nach Deutschland betrachtet.

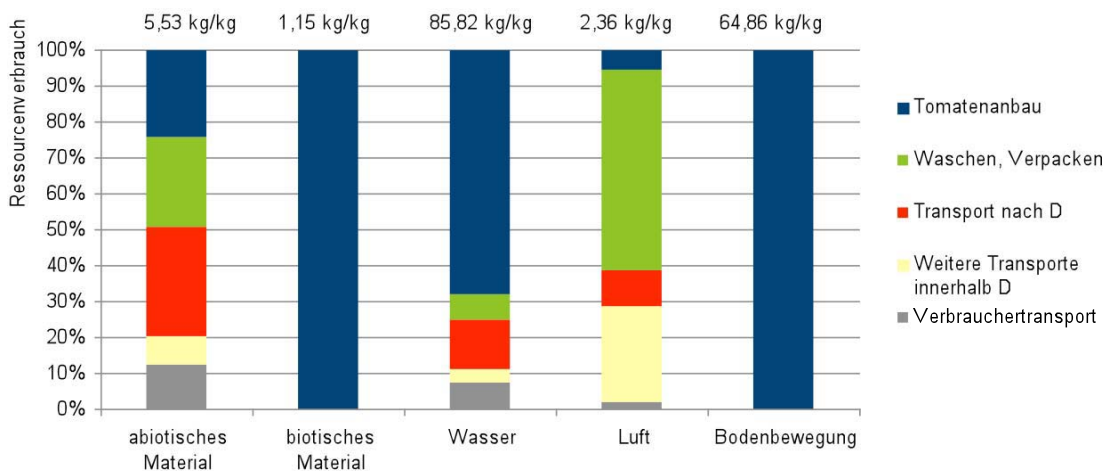
Abb. 47: Ressourcenverbrauch für Tomaten (Unter Glas, Spanien)



Quelle: Eberhard 2010

In Abb. 48 werden die Ressourcenverbräuche der Produktion von italienischen Freilandtomaten dargestellt. Neben der Produktion wurde in diesem Szenario das Waschen, die Verpackung sowie der Transport nach Deutschland betrachtet.

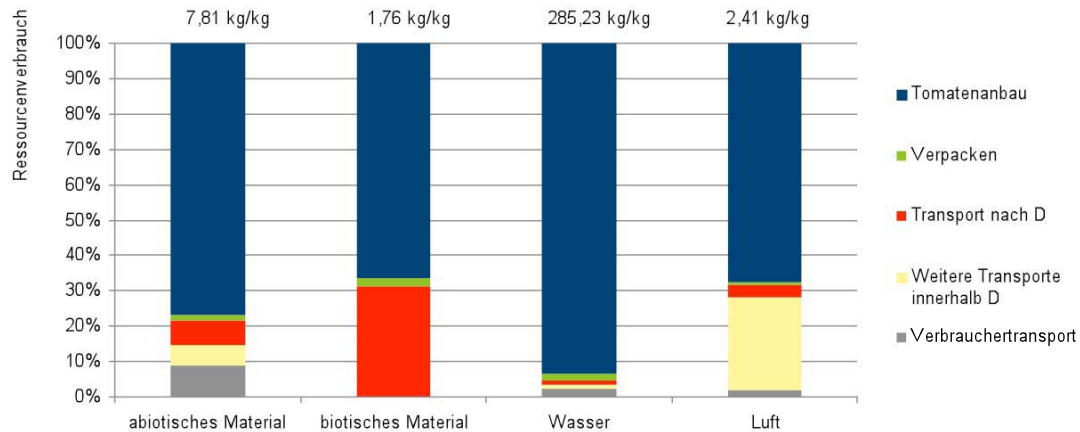
Abb. 48: Ressourcenverbrauch für Tomaten (Freiland, Italien)



Quelle: Eberhard 2010

Abb. 49 stellt den Ressourcenverbrauch der Gewächshausproduktion sowie das Verpacken von frischen Tomaten in den Niederlanden dar..

Abb. 49: Ressourcenverbrauch für Tomaten (Unter Glas, Niederlande)



Quelle: Eberhard 2010

14.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

In dem folgenden Kapitel sollen die ermittelten Potenziale aus den Analysen dargestellt werden, jeweils unterteilt in die einzelnen untersuchten Lebensmittelgruppen.

Fisch

Während des Fangs von Fischen entsteht mit ca. 40 % immer eine relativ große Menge an Beifang (Dacies RWD et al., 2009). Hier ist ein Ansatzpunkt für Effizienzsteigerungen.

Die Abfallprodukte, die im Verarbeitungsprozess von Fisch entstehen, werden in der Regel weiterverarbeitet, z.B. in der Tierfutterindustrie. Folglich ist eine Effizienzsteigerung an dieser Stelle der Wertschöpfungskette nur begrenzt möglich.

Die Berechnungen im Szenario 4 (Abb. 41) deuten darauf hin, dass die Bodenbewegung bei bestimmten Fischereimethoden eine ähnliche Größenordnung wie bei Getreide hat (vgl. Kauppinen et al. 2008). Durch effizientere und nachhaltigere Fischereimethoden, die weniger Bodenbewegung erzeugen, könnten die negativen Folgen des Eingriffs in das Ökosystem Meeresgrund eingeschränkt werden.

Im Vergleich zum Wildfang beansprucht die Aquakultur weniger Fläche. In der vorliegenden Arbeit wurden keine eigenen Werte zur Aquakultur erhoben. In Bezug auf die geringere Flächeninanspruchnahme wird hier ein Potenzial gesehen, allerdings kann der Ressourcenverbrauch durch die Fütterung auch wieder steigen (vgl. Kauppinen et al. 2008). Dieses könnte Betrachtungsgegenstand nachfolgender Untersuchungen sein.

In den Szenarien ist deutlich geworden, dass die Wahl der Verpackungsmaterialien einen gewichtigen Einfluss auf den Materialaufwand haben können (s. Abb. 40). Potenziale liegen daher in der Wahl des Verpackungsmittels, z.B. hat eine „Dose“ aus

Weißblech im Gegensatz zu einer Verpackung aus Polyethylen einen großen Materialaufwand.

Obst und Gemüse

Zitrusarten (Orangen) haben grundsätzlich die Fähigkeit Dürreperioden zu überstehen. Ziel der Tröpfchenbewässerung ist es, Wasserstress der Pflanze zu verhindern und Qualität und Ertrag zu steigern sowie Wassereinsparungen zu erzielen. Durch den Einsatz von Sensoren zur Bodenfeuchtemessung kann der Wasserbedarf von 6000-7000 m³/ha und Jahr auf 4000 m³/ha reduziert werden. (WWF Deutschland 2008) Potenziale liegen in der weiteren Förderung sparsamer Bewässerungstechnologien und in der Entwicklung von Kriterien für Wasser- und Landnutzung im Obst und Gemüsesektor, z.B. durch den Handel, die als Standards für die Branche gelten können.

Durch die Umwandlung des Regenwaldes in eine Monokulturplantage entfallen die Bereitstellung von Nährstoffen aus ausgestorbenem Pflanzenmaterial sowie der natürliche Schutz gegenüber Schädlingen und Krankheiten. So benötigt die konventionelle Bananenproduktion eine hohe Zufuhr externer Inputs wie z.B. Düngemittel und Pestizide. Potenziale können alternative Anbautechniken, z.B. Bepflanzung zwischen den Reihen, bieten. Zudem werden Bananenplantagen mit Hilfe von Kleinflugzeugen aus der Luft mit Fungiziden besprüht. Hierbei werden ca. 15 % vom Wind verfrachtet, 40 % gelangen auf den Boden statt auf die Pflanze und 35 % werden durch Regen weggewaschen. Andere Austragungsformen des Düngers und der Pestizide wären sinnvoll (Giljum 1999).

Zukünftig ist zu erwarten, dass sowohl die drohenden Folgen des Klimawandels als auch die zunehmende Konkurrenzsituation beispielsweise die effizientere Gestaltung der Gewächshausproduktion befördern. Deutlich wird dies bereits heute im niederländischen Gartenbau.

Durch die Literaturrecherche konnten Beispiele zur Material- und Ressourcenschonung für den Bereich des Gemüsebaus ermittelt werden, z. B. die Senkung des Energieverbrauchs in Gewächshäusern durch spezielles Isolierglas oder die Verwendung von biologisch abbaubaren Clipsen und Schnüren zur Befestigung der Pflanzen. In der Literatur wird auch Schafwolle zum Ersatz von Steinwolle als Substrat vorgeschlagen. Dies ist allerdings aus Ressourcengesichtspunkten eventuell kritisch zu bewerten. Hier müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Eine interessante Idee ist der Einsatz von „Fischwasser“ zur Bewässerung und Düngung: Das Abwasser aus Fischzuchtbecken wird an die Tomatenwurzeln gepumpt. Die im Wasser enthaltenen Mineralien, die die Fische im Becken hinterlassen, dienen so den Gemüsepflanzen als zusätzliche Nährstoffe.

Bereits heute gibt es Stadtteile die durch die Abwärme aus Gewächshäusern Wärme gewinnen. Durch die Ansiedelung von Gewächshäusern in der Nähe von Wohngebieten können zudem Transportwege reduziert werden.

14.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die verwendeten Studien beziehen sich in der Regel auf einzelne spezifische Szenarien und sind daher nicht immer verallgemeinerbar. Dies hat zur Folge, dass die in der vorliegenden Analyse entstandenen Daten auch nicht uneingeschränkt verallgemeinerbar sind. Auf Grund der unterschiedlichen Datenlage sind die in dieser Untersuchung betrachteten Szenarien nur eingeschränkt untereinander vergleichbar (z.B. kann man die Freilandtomate aus Italien nicht unmittelbar mit der Gewächshaustomate aus den Niederlanden vergleichen). In der Realität können die Ergebnisse z.B. auf Grund von unterschiedlichen Standortbedingungen stark abweichen.

Mit Hilfe der Ergebnisse kann aufgezeigt werden, dass z.B. in den landwirtschaftlichen Teilbereichen Wasser ein wichtiger Ressourcenfaktor ist. Dies wird in allen Szenarien des Obst- und Gemüsebaus deutlich.

Im Szenario Bananen fällt auf, dass enorme Humusabtragungen in der Erzeugung entstehen. Für andere Obst- und Gemüsearten konnte dieser Wert nicht ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass auch hier die Erosion eine entscheidende Rolle spielt.

Da für die Produktion der des Düngers und der Pestizide zum Teil keine exakten MI-Werte verfügbar waren, sind diese nur mit ihrem Eigengewicht in die Berechnungen eingegangen. Dadurch wird ein wichtiger Faktor vernachlässigt.

Abhängig von den jeweiligen Standortbedingungen gibt es in der Landwirtschaft oft einige Komponenten, die sich länderspezifisch unterscheiden (Beispiel: In südlichen Ländern spielt der Wasserverbrauch eine große Rolle, währenddessen in kälteren Ländern der Energieverbrauch zum Anbau höher ist). Es ist davon auszugehen, dass Abfälle und Ausschüsse, die in der Berechnung von Obst und Gemüse aufgrund der Datenlage nicht integriert wurden, nicht vernachlässigt werden dürfen.

Beim Fischfang entsteht eine relativ große Menge an Beifang. Dies wird in der Öffentlichkeit momentan stark diskutiert. In diesem Rahmen könnten politische Steuerungsinstrumente, z.B. Gesetze und Subventionen, Anreize geben, den Beifang zu verringern. Bei nachhaltigen Fangmethoden (MSC-Label) wird auch auf Art und Menge des Beifang geachtet.

Bei der Betrachtung der Szenarien zu Fisch wird außerdem deutlich, dass die Ressourcenkategorie Bodenbewegung, wie in Szenario Fisch 4 gezeigt, hohe Relevanz haben kann. Bei weiteren Berechnungen müsste dieser Materialaufwand verstärkt berücksichtigt werden.

In den Szenarien der Lebensmittelgruppen wurden die Transportwege berücksichtigt. Dabei fällt auf, dass der Transport der Lebensmittel vom Laden nach Hause deutlich mehr Ressourcen verbrauchen kann als der Transport vom Anbaugelände bis zum Laden. Bereits an diesem Beispiel wird deutlich, wie stark der einzelne Konsument durch die Art und Weise der Einkaufsfahrt den Materialaufwand bestimmen und beeinflussen kann.

Insbesondere im Bereich der nicht berücksichtigten Lagerung, Zubereitung und Entsorgung in den Haushalten werden erhebliche weitere Potenziale zur Ressourceneinsparung, z.B. durch den Anteil an bei der Lagerung verdorbener Ware, Anteile der Speisereste, Art der Zubereitung und verwendeten Geräte vermutet. Diese sollten in weiteren Untersuchungen hinsichtlich ihrer Potenziale analysiert und ggf. Produktgruppenübergreifend zur Verfügung gestellt werden.

Ein zentraler in dieser Untersuchung nicht fokussierter Bereich zur Ressourceneinsparung liegt in der Auswahl der Nahrungsmittel und somit im Ernährungsstil der Konsumenten begründet. Dies zeigen unterschiedliche bereits verfügbare Analysen zur Ressourceneffizienz von Nahrungsmitteln deutlich auf (z.B. Kaiser et al. 2010, Kauppinen et al. 2008).

Als Gesamtfazit zeigen die Ergebnisse der in dieser Arbeit untersuchten Lebensmittelgruppen Größenordnungen des Ressourcenverbrauchs der unterschiedlichen Lebensmittel auf. Es zeigen sich z.T. sehr deutliche Unterschiede in den unterschiedlichen Szenarien, die in weiteren Untersuchungen vertiefend validiert werden sollten. Die bisherige Datenlage zum Ressourcenverbrauch von Lebensmitteln ist verglichen mit anderen Bereichen als relativ schlecht einzustufen. Die Gründe liegen in der Abhängigkeit der Nahrungsmittelproduktion von natürlichen Gegebenheiten wie Klima, Bodenbeschaffenheit, Niederschlagsmengen etc., Unterschieden in den Anbaumethoden (Freiland, Gewächshaus, bio, konventionell) und der nur saisonalen Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln.

Aufgrund der großen Relevanz des Bereiches Ernährung am Gesamtressourcenverbrauch in allen Ländern ist ein systematisches Ressourcenmanagement über die gesamte Wertschöpfungskette, von Produktion und Konsum, notwendig. Dazu ist als Grundlage eine intensive Ausweitung der Untersuchungen zum Ressourcenverbrauch der wichtigsten Nahrungsmittelgruppen und der dazugehörigen Produkte angezeigt.

14.6 Quellenverzeichnis

- Bringezu, S.; Schütz, H.(2001): Material use indicators for the European Union, 1980-1997, Eurostat Working Paper 2/2001/B/2; Luxemburg: Eurostat
- Davies RWD et al. (2009): Defining and estimating global marine fisheries bycatch. Marine Policy (2009), doi: 10.1016/j.marpol.2009.01.003
- Deutsche See (2010): Informationen zu Fangtechniken, Ergänzungen auf der Internetseite, abgerufen am 20.10.2009, unter <http://www.deutschesee.de/fischwelt/fischkunde/fischwissen/fangmethoden.html>
- Eberhard, A. (2010): Potenziale zur Ressourceneffizienzsteigerung in der Lebensmittelproduktion am Beispiel Gemüse. Projektbericht FH Münster, FB Oecotrophologie, Münster
- Fet, A.M.; Schau E.M.; Haskins, C. (2009): A Framework for environmental Analyses of Fish Production Systems Based on Systems Engineering Principles, published online Wiley InterScience DOI 10.1002/sys.20136 Systems Engineering, abgerufen am 20.08.2009

- Food and Agriculture Organization- FAO (2006): The state of world fisheries and aquaculture abgerufen unter http://www1.bpb.de/wissen/CDCEBU.0.Fischbest%E4nde_auf_offener_See.html (am 15.August 2009)
- Fischinformationszentrum e.V. FIZ (2009): Daten und Fakten zum Fisch 2009, Hrsg. Dr. M. Keller, abgerufen am 12.1.2010 unter http://www.fischinfo.de/pdf/d_und_f2009.pdf
- Fischerei in Deutschland (2010): Informationsportal des Bundesministeriums, online unter <http://www.portal-fischerei.de/index.php?id=851>, entsprechende Datenblätter unter <http://www.portal-fischerei.de/index.php?id=1285>
- Fromm, E., Kratochvil, R., Lindenthal T., Milestad, M. und P.H. Brunner (2000): Nachhaltigkeit erkennbar und planbar machen. Beitrag zum 2. SUSTAIN Bericht „Umsetzung nachhaltiger Entwicklung in Österreich“.
- Frosta (2010): Fallstudie Tagliatelle Wildlachs im Rahmen des pcf- Pilotprojektes, FRoSTA, September 2009, abgerufen unter http://www.pcfprojekt.de/files/1257258154/pcf_frosta_tagliatelle_update.pdf (14.2.2010)
- Geier U., Frieben B., Gutsche V., Köpke U (2001): Ökobilanz der Apfelerzeugung in Hamburg. Vergleich Integrierter und ökologischer Bewirtschaftung. Bonn
- Hospido A., Tyedmers P., (2005): Life cycle environmental impacts of spanish tuna fisheries, 76 (2005) 174-189
- Hospido A., Vazquez M.E., Cuevas A., Feijoo G., Moreira M.T. (2006): Environmental assessment of canned tuna manufacture with a life-cycle perspective, J of Resource s, Conservation, Recycling 47 (2006) 56-72
- Giljum, S (1999): Der ökologische Fußabdruck des Bananenbaus in Costa Rica: Ein Vergleich konventioneller und alternativer Produktionsmethoden. Online verfügbar unter http://old.seri.at/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=38&Itemid=39
- Kaiser, C; Ritthoff, M; Rohn, M (2010): Wie viel Natur kostet unsere Nahrung? Ein Beitrag zur Materialintensität ausgewählter Produkte aus Landwirtschaft und Ernährung. Wuppertal Papers (im Erscheinen), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal
- Kauppinen, T., Lähteenoja, S., Lettenmeier, M. (2008). Kotimaisten elintarvikkeiden materiaali-panos - Elintarvike MIPS (Material Input of Finnish foodstuffs, in finnische Sprache). Maa- ja elintarviketalous 130. Jokioinen: MTT.
- Kristof, K. (2004): Umweltentlastung durch die Nutzung von Effizienzpotenzialen. Berlin. Online unter http://www.materialeffizienz.de/dateien/aktuelles/kristof_umweltentlastung.pdf
- Lukas, M. (2010): Potenziale zur Ressourceneffizienzsteigerung in der Lebensmittelproduktion am Beispiel Fisch. Projektbericht FH Münster, FB Oecotrophologie, Münster
- Mancini L., Lettenmeier M., Rohn H., Liedtke C. (2010): Material flows-based indicators for evaluating agrofood systems sustainability: a survey on Italian beef. Paper presented at the 119° EAAE Seminar - Sustainability in the Food Sector: Rethinking the Relationship between the Agro-Food System and the Natural, Social, Economic and Institutional Environments. Capri 30 June – 2 July, 2010.
- Pelletier NL, Ayer NW, Tyedmers PH, Kruse SA, Flysio A, Robillard G, Ziegler F, Scholz AJ, Sonesson U (2007): Impact categories for Life cycle Assessment Research of Seafood Production Systems, Review and Prospectus, Int J LCA 12 (6) 414-421
- REWE-Group (2009): Fallstudie „Best Alliance“ – Früherdbeeren der REWE Group.
Online verfügbar unter www.pcf-projekt.de/download/1232962839/main/results/casestudies/

- Ritthoff, M. / Rohn, H. / Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen. Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal Spezial Nr. 27 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal
- Sanjuán N, Úbeda L, Clemente G, Mulet A (2005): LCA of integrated orange production in the Comunidad Valenciana (Spain). Int. J. Agricultural Resources Governance and Ecology, Vol. 4, No 2
- Stöwer, L. (2010): Potenziale zur Ressourceneffizienzsteigerung in der Lebensmittelproduktion am Beispiel Gemüse. Projektbericht FH Münster, FB Oecotrophologie, Münster
- Taylor, C. (2000): „Ökologische Bewertung von Ernährungsweisen anhand ausgewählter Indikatoren“, Dissertation Uni Gießen
- Wiegmann, Eberle, Fritsche, Hünecke (2005): „Ernährungswende- Umweltauswirkungen von Ernährung, Stoffstromanalyse und Szenarien“
- Wilms, F. (2006): Szenariotechnik. Vom Umgang mit der Zukunft, Haupt Verlag, Bern 2006
- WWF Deutschland, FB Süßwasser (2008): Zitrusfrüchte. Online verfügbar unter www.wwf.de/downloads/publikationsdatenbank/ddd/29707/
- Ziegler F., Nilsson P., Mattsson B., Walther Y. (2002): LCA of frozen cod fillets including fishery-specific environmental impacts. Int J LCA 8 (1) 39-47

15 Ressourceneffizienzpotenziale der Intelligenten Landtechnik am Beispiel des Einsatzes von Stickstoffsensoren in der Düngung

Lisa Schimanski (Technische Universität München)

Prof. Dr. agr. habil. Heinz Bernhardt (Technische Universität München / Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik)

Markus Heckmann (Technische Universität München / Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik)

Martin Grismajer (Technische Universität Berlin / Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb)

15.1 Einleitung

Um für die zunehmende Bevölkerung der Erde hochwertige Nahrungsmittel ressourcenschonend zu erzeugen und somit langfristig stabile Erträge in der Landwirtschaft zu erzielen, reichen der Züchtungsfortschritt und die ständigen Weiterentwicklung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln alleine nicht aus. Ein weiterer Ansatz ist die teilflächenspezifische Bewirtschaftung in der Pflanzenproduktion (Precision Farming). Hierbei werden Technologien der Intelligenten Landtechnik vor allem für die angepasste Bewirtschaftung aufgrund kleinräumiger Informationen über die Flurstücke und die Pflanzenbestände eingesetzt. Die Informationen werden zur präzisieren Steuerung der landwirtschaftlichen Geräte eingesetzt. Beispiele für Technologien sind Berechnungssysteme, Spurführungshilfen, Lenkhilfen/-assistenzsysteme sowie automatische Lenksysteme unter Nutzung des Global Positioning Systems z.B. für besseres Anschlussfahren oder die Vermeidung von Überlappungen oder die Erstellung von digitalen Bodenkarten mit Informationen über dessen Eigenschaften bzw. enthaltene Stoffe zur angepassten Bodenbearbeitung und teilflächenspezifischen Ausbringung von Saatgut, Dünger (bspw. unter Nutzung von Applikationskarten, die auf der Basis von Bodenproben den Düngerbedarf feststellen) oder Pflanzenschutzmitteln.

Angepasste Bewirtschaftung kann gezielteren Einsatz von Ressourcen zur Folge haben. In dieser Arbeit wird an einem Fallbeispiel untersucht, wie Intelligente Landtechnik zur Ressourcenschonung beitragen kann. Ausgewählt wurde die Verbesserung der Düngung mit Stickstoff. Stickstoff ist wichtig für das Wachstum der Pflanzen und deren Ertrag, eine angepasste Zufuhr in Form von Mineraldünger ist dementsprechend wichtig. Liegt Stickstoffmangel vor, so kann es zu Blattverfärbungen, Absterben von Gewebe sowie einer schlechteren Entwicklung von Trieben bzw. der Kornausbildung und einem niedrigeren Eiweißgehalt kommen, wodurch mit Ertragseinbußen zu rechnen ist. Bei einem Überschuss kann es zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen, einem verstärkten Wachstum der Pflanze und zu erhöhter Entwick-

lung von Trieben kommen. Dies kann zu einer verminderten Standfestigkeit und einem großflächigen Abknicken der Halme führen, was sich durch ressourcenaufwändiges Verkürzen der Halme ausgleichen lässt.

Die für den Bestand sinnvolle Stickstoffmenge variiert von Jahr zu Jahr, von Sorte zu Sorte und auch innerhalb eines Schlags. Durch sensorgestützte „variable“ Online-Stickstoffdüngung ist es möglich, diese Menge zu ermitteln und die Düngung an den Bedarf der Pflanzen anzupassen. Sensoren ermitteln Stickstoffaufnahme/Stickstoffgehalt von Pflanzen. Diese Information wird zur Ermittlung des spezifischen Bedarfs an Stickstoff verwendet und der Düngerstreuer entsprechend angesteuert. Damit können die Düngermenge verringert und gleichzeitig der Ertrag gesteigert werden (Agricon 2010). Die daraus resultierenden Ressourceneinsparungspotenziale sollen abgeschätzt werden.

15.2 Vorgehensweise

Für den weit verbreiteten Weizenanbau wird die konstante Düngung ohne Stickstoffsensoren (Ist-Zustand) mit der variablen Düngung mit Stickstoffsensoren (Fallstudie) verglichen (Schimanski 2010).

15.2.1 Untersuchte Szenarien

Untersuchungsgegenstand ist die Düngung eines Weizenfeldes. Weizen ist eine der verbreitetsten Getreidearten, sowohl in Bezug auf die Anbaufläche mit ca. 30 % der Getreide-Anbaufläche weltweit, als auch in Bezug auf die Erntemenge mit ca. 30 % weltweit (Doleschel 2006). Als Dünger wird Kalkammonsalpeter (KAS) betrachtet, der in der Landwirtschaft Mitteleuropas am häufigsten ausgebracht wird und einen Stickstoffgehalt von 27 % besitzt (Oehmichen 2000, KTBL 2009).

Im Szenario „Ist-Zustand“ erfolgt die konstante Düngung eines Weizenfeldes, die Düngermenge wird also gleichmäßig über ein Feld verteilt.

Im Szenario „Fallstudie“ erfolgt eine variable Düngung mit Einsatz eines Stickstoffsensors zur angepassten Düngung. Als Beispiel wurde der „N-Sensor“ (Variante optisch passiv, ohne eigene Lichtquelle) des Herstellers Yara ausgewählt. Das Gerät wird auf dem Dach des Traktors installiert, der den Düngerstreuer transportiert, antreibt und steuert, und misst von dort mit Hilfe von zwei Sensorköpfen schräg, senkrecht zur Fahrtrichtung, nach unten. Die Sensoren beinhalten ein optisches System, das eine Spektralanalyse des von den Pflanzen reflektierten Lichts durchführt, deren Ergebnisse bei entsprechender Kalibrierung auf den Ernährungszustand und somit auf die Stickstoffversorgung der Pflanzen schließen lassen. Die Sensoren erfassen dabei die Bestände ca. 5-6 m rechts und links der Fahrspur. Mit Hilfe eines Prozessrechners wird abhängig von Kulturart, Sorte sowie Entwicklungszustand eine angepasste Düngermenge ermittelt und im Sekundentakt als Sollwertvorgabe an den Düngerstreuer gegeben (Hanns 2009).

15.2.2 Definition der Service-Einheit

Intelligente Landtechnik wird vor allem von Betrieben genutzt, die über große Anbauflächen verfügen. So liegt der Durchschnitt an landwirtschaftlich genutzter Fläche in Deutschland bei 48,5 ha pro Betrieb (Deutscher Bauernverband 2009). In den neuen Bundesländern können Betriebsgrößen auch bei mehreren Hundert ha liegen. Da eine fortschreitende Umstrukturierung hin zu größeren Betrieben angenommen wird (Krieger 2010), wird im betrachteten Fallbeispiel von einem zukunftsgerichteten Betrieb mit einer Größe von 800 ha ausgegangen.

Zur längerfristigen Existenz eines Betriebes ist es sinnvoll, Monokulturen (z. B. nur Weizen auf 800 ha) zu vermeiden und für eine Abwechslung von Blatt und Halmfrucht zu sorgen. Beispielhaft wird dementsprechend von einer Aufteilung 50 % Weizen, 25 % Raps, 25 % Mais ausgegangen und entsprechend nur Weizen mit einer Gesamtanbaufläche von 400 ha in die Berechnung einbezogen, z. B. 5 Schläge mit jeweils 80 ha. Aufgrund seiner Bedeutung wird ein Winterweizen betrachtet, dessen Anbaufläche in Deutschland 2009 3.178.000 ha betrug, im Vergleich zu Sommerweizen auf nur 37.000 ha. Zudem ist bei Winterweizen mit höheren Erträgen als bei Sommerweizen zu rechnen (Deutscher Bauernverband 2009). Als Serviceeinheit wird entsprechend der Material-Input für die Düngung von 400 ha Winterweizen-Gesamtanbaufläche verwendet.

15.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

In beiden Szenarien werden das Material KAS, der Transport des Düngers von der Fabrik bis zum Großhändler sowie vom Großhändler bis zum Landwirt mit dem LKW und der Kraftstoff Diesel für das zweimalige Ausbringen des Düngers auf dem Feld berücksichtigt. Weitere Hilfs- und Betriebsstoffe sind nicht Teil des Modells. Es wird von einem pneumatischen Düngerstreuer mit einer Arbeitsbreite von 24 m ausgegangen, der für die Größe der Anbaufläche geeignet scheint und eine hohe Verteilgenauigkeit bietet. Es wird angenommen, dass dafür ein Traktor mit einer Nennleistung von 83 kW geeignet ist, an den der Düngerstreuer angebaut ist.

In der Fallstudie wird zusätzlich die Herstellung des Stickstoffsensors betrachtet. Hierbei wird angenommen, dass bei der betrachteten Gesamtanbaufläche 400 ha ein Sensor zum Einsatz kommt. Alle Annahmen zum Sensor werden zu dem spezifischen Produkt „N-Sensor“ des Herstellers Yara getroffen. Seine Zusammensetzung ist nicht bekannt, das Gerät besteht im Wesentlichen aus Stahl, Kunststoff und der Rechentechnik (Hanns 2010). Deshalb werden Stahl, Kunststoff und die Rechentechnik als „Prozessrechner“ in die Berechnung einbezogen.

15.2.4 Datenerfassung

Nachfolgend werden die Schritte der Datenerfassung und Berechnung am Beispiel des Szenarios „Ist-Zustand“ zusammengefasst. Es wird von drei Stickstoffgaben ausgegangen, wobei die erste zeitig im Frühjahr erfolgt und eine Menge von 50 kg Stickstoff/ha empfohlen wird (KTBL 2009). Diese erste Gabe ist im Ist-Zustand und in der

Fallstudie gleich. Bei der zweiten Stickstoffgabe wird von insgesamt 100 kg Stickstoff/ha ausgegangen, abzüglich des N_{\min} -Gehaltes im Boden. Der N_{\min} -Gehalt beschreibt in Abhängigkeit von der Vorfrucht (die Fruchtart, die im vorherigen Jahr angebaut wurde) den aktuellen Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Boden. Der N_{\min} -Gehalt beträgt im Durchschnitt bei Winterweizen nach Winterraps 79 kg/ha (KTBL 2009). Es ergeben sich demzufolge 21 kg Stickstoff/ha. Bei der dritten Stickstoffgabe werden für einen Winterweizen ca. 80 kg Stickstoff/ha empfohlen (KTBL 2009). Entsprechend ist mit einer Gesamtstickstoffmenge unter Berücksichtigung des N_{\min} -Gehaltes von 151 kg/ha zu rechnen, für 400 ha also 60.4 t Stickstoff, was einer Menge an KAS von 223,7 t entspricht. Nach (KTBL 2009) wird ein Ertrag von 81,3 dt/ha angenommen. Für den Transport der 223,7 t KAS von der Fabrik (angenommen in Rostock, da sich dort eine Produktionsstätte des großen Düngemittelherstellers Yara GmbH & Co KG befindet) zum Großhändler (angenommen wird ein Ort in den neuen Bundesländern) wird einer Entfernung von 450 km angenommen. Vom Großhändler wird der KAS zum Landwirt über eine angenommene Distanz von 30 km transportiert. Für die Ausbringung mit Traktor und pneumatischem Düngerstreuer wird der Diesel-Verbrauch für den Weg zum Feld und die Ausbringung berechnet. Beim Beladen des Anhängers und dem Transport zum Feld liegt ein Dieselmotorkraftstoffbedarf von 0,22 l/ha vor. Bei der Ausbringung sind pro ha 1,11 l Diesel/ha erforderlich (KTBL 2009, KTBL 2005).

Fallstudie: Die Werte für durchschnittliche Mehrerträge aufgrund der variablen Düngung basieren auf Ertragsversuchen mit dem Yara N-Sensor mittels Ertragskartierung in Großflächenversuchen durch den Hersteller Yara bis 2009. Zunächst wurden Parzellen konstant gedüngt mit orts- bzw. betriebsüblicher Düngemenge, die durch den Betriebsleiter festgelegt wurde. Danach erfolgten die Kalibrierung des Stickstoffsensors und die Düngung anderer Parzellen mit variabler Düngung. Es ergaben sich eine Ertragssteigerung von 6 % und gleichzeitig eine Verringerung des Stickstoffeinsatzes bei der zweiten und dritten Gabe um 12 % (Agricon 2010). Die Düngermenge reduziert sich somit auf 514,37 kg KAS/ha. Die Mehrerträge von 4,88 dt/ha aufgrund der Ertragssteigerung werden umgerechnet in Dünger-Einsparung. So sind nach (ITADA 1996) pro dt Ertrag 2,3 kg Stickstoff und damit 8,52 kg KAS erforderlich, was eine zusätzliche KAS-Einsparung von 41,58 kg/ha ergibt. Die Düngermenge wird so insgesamt auf 472,82 kg KAS/ha reduziert, was 189,1 t für 400 ha entspricht. Für die Zusammensetzung des hinzukommenden Yara Stickstoffsensors werden die Bestandteile 10 kg Oxygenstahl, 5 kg Polyethylen mit niedriger Dichte und 5 kg Prozessrechner abgeschätzt.

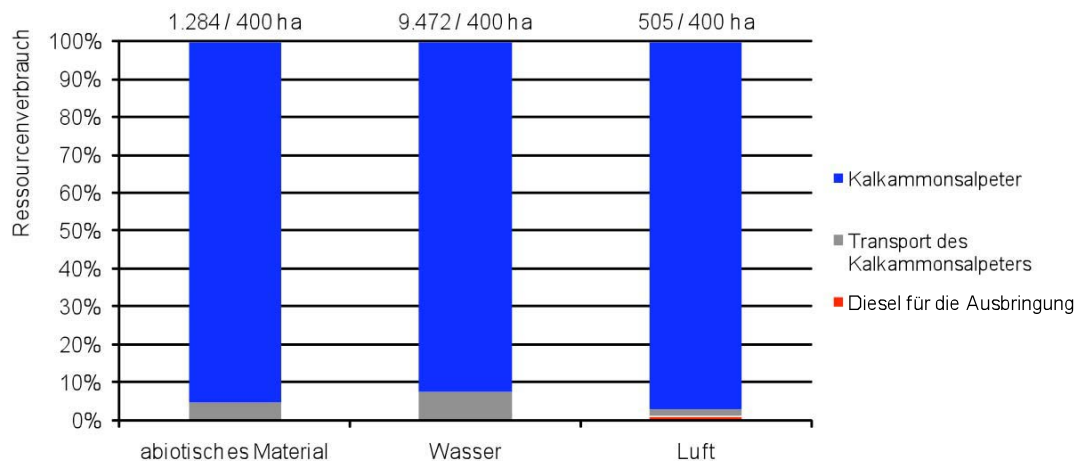
Für die Berechnung des Ressourcenverbrauchs nach dem MIPS (Material-Input pro Serviceeinheit) Konzept wurden die MI-Werte nach (Lettenmeier et al. 2009) verwendet. Für den LKW-Transport werden hierbei Werte mit Berücksichtigung der Infrastruktur verwendet. Nur die Abschätzung des Ressourcenverbrauchs für die Herstellung des Prozessrechners erfolgte in Anlehnung an die Aussagen zur Materialintensität eines Notebooks nach (Moisio et al. 2008) skaliert für das Gewicht des Prozessrechners.

15.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

15.3.1 Ressourcenverbrauch bei konstanter Düngung ohne Stickstoffsensor (Ist-Zustand)

Der Ressourcenverbrauch bei konstanter Düngung beträgt 1.284 t in der Kategorie „abiotisches Material“, 9.472 t für Wasser und 505 t für Luft bezogen auf die betrachtete Gesamtanbaufläche 400 ha. In allen Ressourcenkategorien wirkt sich die Herstellung der 223,7 t Dünger KAS mit 95,5 % (abiotische Materialien), 92,7 % (Wasser) und 97,1 % (Luft) am stärksten aus (Abb. 50). Der LKW-Transport des Düngers über die zweigeteilte Strecke vom Hersteller bis zum Landwirt hat nur bei den abiotischen Materialien mit 4,4 % und bei Wasser mit 7,1 % einen nennenswerten Einfluss. Der Verbrauch des Diesels für die Ausbringung wirkt sich kaum aus, z. B. in der Kategorie „Luft“ noch am stärksten mit 1,0 %.

Abb. 50: Ressourcenverbrauch und Anteile am Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für den Ist-Zustand (in t für die Düngung von 400 ha Gesamtanbaufläche)

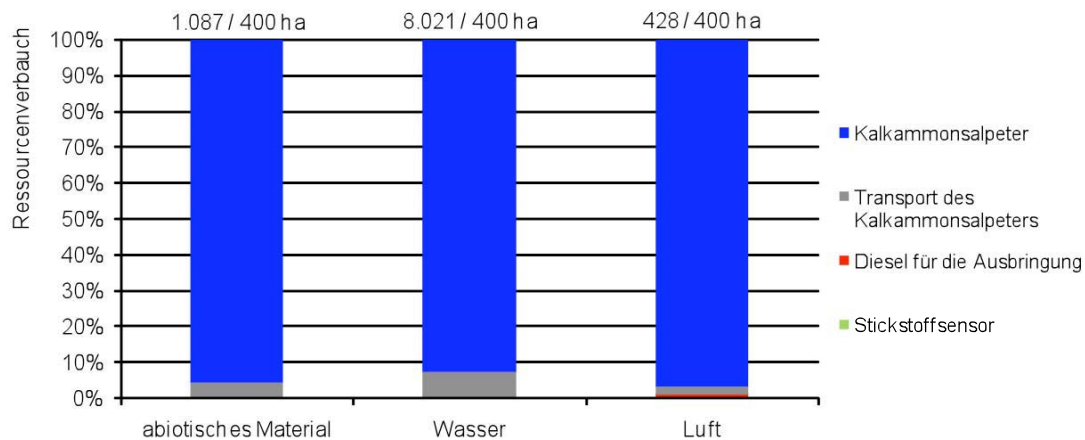


Quelle: nach Schimanski 2010

15.3.2 Ressourcenverbrauch bei variabler Düngung mit Stickstoffsensor (Fallstudie)

In der Fallstudie beträgt der Ressourcenverbrauch 1.087 t in der Kategorie „abiotisches Material“, 8.021 t für Wasser und 428 t für Luft bezogen auf die Gesamtanbaufläche 400 ha (Abb. 51).

Abb. 51: Ressourcenverbrauch und Anteile am Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für die Fallstudie (in t für die Düngung von 400 ha Gesamtanbaufläche)



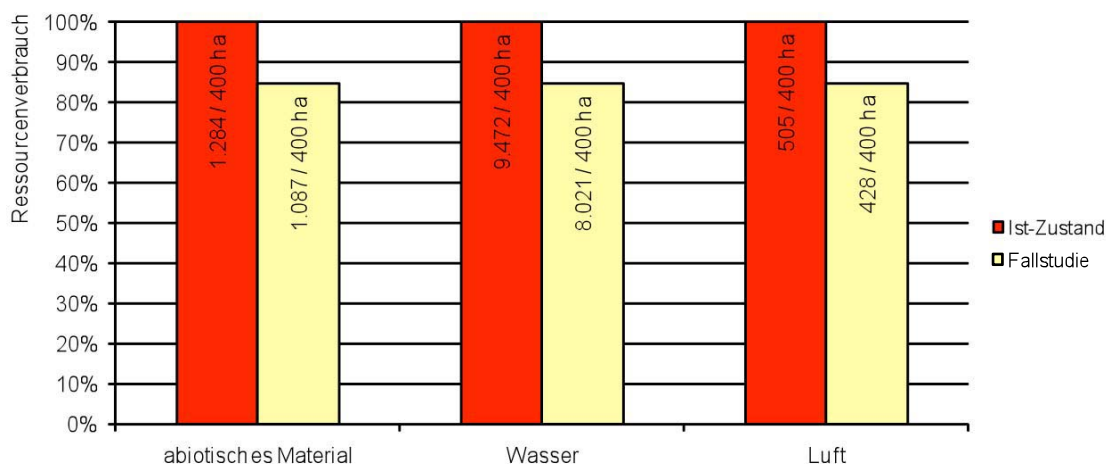
Quelle: nach Schimanski 2010

Die Einflüsse auf die Aufteilung des Ressourcenverbrauchs stellen sich ähnlich dar wie im Ist-Zustand. In allen Ressourcenkategorien wirkt sich die Herstellung für die 189,1 t Dünger KAS mit 95,4 % (abiotische Materialien), 92,6 % (Wasser) und 96,8 % (Luft) am stärksten aus. Der Transport des Düngers hat ebenso nur bei den abiotischen Materialien mit 4,3 % und bei Wasser mit 7,1 % einen nennenswerten Einfluss. Der Verbrauch des Diesels für die Ausbringung wirkt sich kaum aus, hier in der Kategorie „Luft“ am stärksten mit 1,2 %. Der zusätzliche Stickstoffsensor beeinflusst den Ressourcenverbrauch kaum, z. B. in der Kategorie „Wasser“ noch am stärksten mit 0,1 %.

15.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

In der Fallstudie reduziert sich der Ressourcenverbrauch um 197,4 t in der Kategorie „abiotisches Material“, um 1.452 t in der Kategorie „Wasser“ und um 76,8 t in der Kategorie „Luft“, bezogen auf die betrachtete Gesamtanbaufläche 400 ha. Dies entspricht relativ einer Einsparung von abiotische Materialien um 15,4 %, von Wasser um 15,3 % und von Luft um 15,2 % (Abb. 52).

Abb. 52: Ressourcenverbrauch für die Düngung eines Weizenfeldes mit 400 ha Gesamtanbaufläche bei variabler Düngung (Fallstudie) bezogen auf die konstante Düngung (Ist-Zustand) nach MIPS-Kategorien



Quelle: Schimanski 2010

Diese Reduzierung ergibt sich hauptsächlich, weil bei der variablen Düngung die erforderliche Düngermenge durch die 12 % Düngereinsparung sowie den umgerechneten Mehrertrag von 6 % um 86,4 kg/ha und damit 34,6 t für die betrachtete Gesamtanbaufläche mit 400 ha gesunken ist und die Herstellung des Kalkammonsalpeters den größten Anteil am Ressourcenverbrauch hat. Zu einem kleinen Teil der Verringerung trägt auch der Transport der nun geringeren Düngermenge von 189,1 t bei. Da auch in der Fallstudie die Ausbringung wie im Ist-Zustand abläuft, wird keine Reduzierung des Diesels für die Ausbringung angenommen und der entsprechende absolute Anteil am Ressourcenaufwand ist gleich. Durch den zusätzlichen Stickstoffsensor steigt der Ressourcenaufwand beim Übergang von Ist-Zustand auf Fallstudie in der Kategorie „abiotisches Material“ um 0,7 t, in der Kategorie „Wasser“ um 10,1 t und in der Kategorie „Luft“ um 0,4 t bezogen auf die betrachtete Feldfläche. Aufgrund seines geringen Einflusses fällt dieser Anstieg aber kaum ins Gewicht und wird durch die um ein vielfaches größeren Einsparungen überkompensiert. In Tab. 41 sind die Verbräuche und Einsparungen noch einmal zusammengefasst.

Tab. 41: Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien

Ressourcenverbrauch			
Szenario	abiotisches Material	Wasser	Luft
konstante Düngung (Ist-Zustand)	1.284 t / 400 ha	9.472 t / 400 ha	505 t / 400 ha
variable Düngung mit Stickstoffsensor (Fallstudie)	1.087 t / 400 ha	8.021 t / 400 ha	428 t / 400 ha
Einsparpotenzial			
Typ des Einsparpotenzials	abiotisches Material	Wasser	Luft
absolute Einsparung (Differenz)	197 t / 400 ha	1.452 t / 400 ha	76,8 t / 400 ha
relative Einsparung (zu Ist-Zustand)	15,4%	15,3%	15,2%

Quelle: nach Schimanski 2010

Für eine grobe Abschätzung des Ressourcenverbrauchs bezogen auf Gesamt-Deutschland wurde folgendes angenommen: Der Hersteller des Sensors Yara bzw. der Vermarkter Agricon geben an, dass in Deutschland auf 500.000 ha Fläche mit 462 der Yara-Sensoren variabel gedüngt wird (Agricon 2010a, Krieger 2010). Somit wird ein Sensor vereinfacht gerechnet für 1.082 ha Fläche eingesetzt. Es ist beispielsweise nicht berücksichtigt, dass nicht alle der von Agricon angegebenen Sensoren tatsächlich noch im Einsatz sein müssen. Für eine Hochrechnung für Deutschland wird ebenfalls nur Winterweizen betrachtet, da andere Pflanzen ggf. anders gedüngt werden und die im Fallbeispiel betrachteten Werte so nicht verwendbar wären. Die Anbaufläche des Jahres 2009 für Winterweizen betrug 3.178.000 ha (Deutscher Bauernverband 2009). Um die Fläche abzuschätzen, auf der Stickstoffsensoren eingesetzt werden könnten, wurden folgende Flächen abgezogen: Die Fläche 500.000 ha, die für die Düngung mit Yara-Sensoren angegeben wurde; die Fläche 150.000 ha, die evtl. durch andere vergleichbare Systeme variabel gedüngt wird (auf der Grundlage von Yara 2010 und KTBL 2009 wurde deren Anzahl mit ca. 125 abgeschätzt und wegen ggf. nicht aktueller Daten auf 140 erhöht; mittels der o.g. Zuordnung 1 Sensor für 1.082 ha wurden entsprechend ca. 150.000 ha abgeschätzt); 150.000 ha, bei denen etwa mit Applikationskarten variabel gedüngt wird (Proplanta 2009). Es bleiben 2.378.000 ha, von denen noch einmal 475.600 ha entsprechend 20 % abgezogen werden. Dieser Wert dient als Korrektur z. B. für kleine und damit ggf. ungeeignete Flächen (z. B. gibt es nach (Deutscher Bauernverband 2009) 9,5 % landwirtschaftliche Betriebe mit kleinen Flächen zwischen 2 und 20 ha mit ggf. geringerer Wahrscheinlichkeit des Sensoreinsatzes), für ggf. veraltete Zahlen oder Flächen mit ökologischem Landbau, auf denen nicht mit Mineraldünger wie KAS gedüngt werden kann (z.B. wurde 2008 in Deutschland auf ca. 5% der landwirtschaftlich genutzten Fläche ökologischer Landbau betrieben (Deutscher Bauernverband 2009)). Somit ergibt sich eine Restfläche von 1.902.400 ha, für die ausgehend von der Verteilung der Yara-Sensoren 1.758 Sensoren geeignet sein könnten.

Zwischen den über Deutschland verteilten Anbauflächen werden vereinfachend keine Unterschiede betrachtet. Im Gegensatz zum Fallbeispiel wird für die Distanz zwischen KAS-Hersteller (angenommen an der Nord- oder Ostseeküste) und den Landwirten (maximal ca. 600 km davon entfernt, da weiter südlich die Niederschlagsmenge für den Anbau von Winterweizen zu hoch wäre) ein Wert von durchschnittlich 300 km angenommen. Auch hier wird Transport mit dem LKW angenommen und eventuelle Binnenschifffahrt vernachlässigt, für die ein geringerer Ressourcenaufwand zu erwarten wäre (Lettenmeier et al.). Es ergibt sich für die variable Düngung von 1.902.400 ha Fläche mit 1758 Sensoren ausgehend von den Berechnungen für 400 ha ein Ressourcenverbrauch von 6,0 Mio. t (Ist-Zustand) bzw. 5,1 Mio. t (Fallstudie) für abiotisches Material, 43,8 Mio. t (Ist-Zustand) bzw. 37,1 Mio. t (Fallstudie) für Wasser und 2,38 Mio. t (Ist-Zustand) bzw. 2,02 Mio. t (Fallstudie) für Luft. Diese erste Schätzung ist mit großer Vorsicht zu genießen, da sie aufgrund nur weniger Einflussgrößen eher grob erstellt wurde. Deshalb soll an dieser Stelle nicht auf ein mögliches deutschlandweites Einsparungspotenzial eingegangen werden.

15.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse zeigen an einem Beispiel, wie Intelligente Landtechnik genutzt werden kann, um Ressourcen zu sparen. Eine qualitative Bewertung mit weiteren Kriterien ist in Tab. 42 zusammengefasst.

Tab. 42: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Konstante Düngung ohne Stickstoffsensoren (Ist-Zustand)	Variable Düngung mit Stickstoffsensoren (Fallstudie)
Ressourceneinsatz	Hoch. Liegt bei 151 kg N/ha bei Weizen. Andere Kulturen benötigen weniger Stickstoff, so liegt der Einsatz bei Wintergerste bei 111 kg N/ha (KTBL 2009).	Niedriger aufgrund der Düngereinsparung und Ertragssteigerung.
Ressourceneffizienzpotenzial	Niedrig, da derzeit ohne zusätzliche Technik kaum Einsparungen möglich	Hoch, da bei Stickstoffsensoren-Einsatz Dünger gespart, der Ertrag gesteigert und die Aufwendungen für den Transport verringert werden können.
Sonstige Umweltauswirkungen	Belastung von Gewässern durch Stickstoffverlagerung in Form von Nitrat-Auswaschung. Dabei wird Stickstoff in nicht mehr durchwurzelte Bodenschichten oder sogar ins Grundwasser verlagert, was zu einer Verschlechterung der Trinkwasserqualität führen kann (Hege et al. 2006).	Geringere Auswaschung wegen geringerer Stickstoffmenge vermutet
Realisierbarkeit	Gängiges Verfahren	Stickstoffsensoren werden seit Ende der 1990er in den Markt eingeführt, und erste Verbreitung ist gegeben. Somit ist von Funktionstüchtigkeit und somit guter Realisierbarkeit für weitere Flächen auszugehen (Krieger 2010). Kostenaufwand für den Sensor müsste noch mit erzielbaren Einsparungen verglichen werden. Stickstoffsensoren scheinen erst ab einer gewissen Betriebsgröße lohnenswert, für genauere Angaben müssten Getreidepreise und Betriebskosten beachtet werden.
Wirtschaftliche Bedeutung	Große Bedeutung, da Stickstoffversorgung der Pflanzen u.a. Ertrag beeinflusst	Hohe Bedeutung durch Ertragssteigerung. Marktpotenzial für Stickstoffsensoren vor allem in Regionen, die heute noch als kleinstrukturiert gelten und in denen ggf. durch Umstrukturierung größere Betriebe entstehen, außerdem evtl. Entstehung weiterer Maschinenringe die gemeinsame Nutzung von Sensoren ermöglichen.

Kommunizierbarkeit	Von den Landwirten angenommen bzw. Stickstoffdüngung als erforderlich angesehen.	Bei Betrieben ab ca. 200 ha gut. Versuchsergebnisse, die die Vorteile der Stickstoffsensoren zeigen, scheinen akzeptiert. Es wird vermutet, dass zahlreiche Landwirte noch zurückhaltend beim Einsatz neuer Technologien sind und entsprechend verständliches Informationsmaterial zur Verbreitung beitragen könnte.
Übertragbarkeit	Gegeben, da zahlreiche Kulturen bereits durch Dünger verschiedener Ausprägungen mit Stickstoff versorgt werden	Es bestehen Einschränkungen, Anwendung nur in grünen Pflanzenbeständen möglich, bspw. Getreidekulturen, Raps, Mais, Kartoffeln.

Quelle: Schimanski 2010

In der Fachwelt werden weitere positive Auswirkungen dieser Technologie diskutiert. So sollen sich Verbesserungen hinsichtlich des Proteingehalts, der Druschfähigkeit, des Erntefensters, der Homogenität hinsichtlich der Ährenhöhe/-anzahl und des sog. Lagers, dem großflächigen Abknicken der Halme, ergeben. Zu belegen sind noch die Verbesserung der Stickstoff-Bilanz sowie eine geringere Anfälligkeit für Blattkrankheiten. Positiv könnte sich die geringere Düngermenge bei der Fallstudie auf den Ressourceneinsatz beim Ausbringvorgang auswirken, da durch die Düngereinsparung ggf. der Streuer weniger oft nachgetankt werden muss. Beim Transport des Düngers vom Hof zum Feld sind die Unterschiede nur schwer quantifizierbar. Da die Motoren während dieser Zeit i.a.R. nicht abgestellt werden, kann sich daraus ein verminderter Dieselaufwand ergeben. Dieser Einfluss ist allerdings als eher gering zu bewerten.

Es werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet: Es wurde gezeigt, dass Intelligente Landtechnik zur Ressourceneinsparung beitragen kann, demzufolge sollte auf diesem Gebiet die Forschung durch Förderprogramme vorangetrieben werden. Ein Stickstoffsensor amortisiert sich wirtschaftlich möglicher Weise erst ab einer gewissen Betriebsgröße, weswegen im Berechnungsbeispiel 400 ha als betrachtete Gesamtanbaufläche in einem Betrieb mit 800 ha angenommen wurden. Durch die Umstrukturierung vieler Betriebe hin zu größeren Betriebsflächen, werden Stickstoffsensoren für mehr Betriebe interessant. Kleinere Betriebe könnten Stickstoffsensoren gemeinsam nutzen, wie dies in Maschinenringen für Maschinen bereits praktiziert wird. Außerdem könnten Lohnunternehmen die Sensoren verleihen oder die Arbeiten in unterschiedlichen Betrieben durchführen. Hersteller von Landtechnik-Systemen sollten Strategien entwickeln, wie auch Landwirte erreicht werden können, die bisher keinen Bezug zu intelligenter Landtechnik haben. Außerdem sollten Geschäftsmodelle entwickelt werden, die mit günstigen Einstiegskonditionen die Nutzung von Technik ermöglichen, die Ressourcen einspart.

In weiteren Forschungsarbeiten sollte untersucht werden, inwieweit weitere Betriebs- oder Hilfsstoffe das Ergebnis beeinflussen oder weitere Transporte erforderlich sind. Der Kostenaufwand für den Sensor sollte mit erzielbaren Einsparungen verglichen werden, um Wirtschaftlichkeit, Realisierbarkeit und Kommunizierbarkeit besser bewert

ten zu können. Die Ergebnisse der Untersuchung müssen zudem kritisch betrachtet werden, da die Angaben zu erzielbaren Einsparungen und Ertragssteigerungen auch auf Angaben des Vermarkters Agricon für den Typ Yara N-Sensor basieren. Durch unterschiedliche regionale Bedingungen oder Umwelteinflüsse (z. B. starker Regen mit erhöhter Lagerneigung) sowie den Einsatz von Systemen anderer Hersteller können die Ergebnisse in der Realität abweichen oder schwanken. Zudem können die Ergebnisse nicht ohne weitere Untersuchungen auf andere Verfahren der teilflächenspezifischen Düngung übertragen werden. Zu beachten ist, dass der Sensor ausreichend Biomasse auf dem Feld erfordert. Ist zu viel Boden „zu sehen“, kann es zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen. Zudem ist das System abhängig von der Kalibrierung, für die die Landwirte Sorge tragen. In der Fachwelt wird jedoch diskutiert, ob sich Regelalgorithmen basierend auf Düngungsdauerversuchen hinterlegen lassen, um die Kalibrierung zu vermeiden. Die Zusammensetzung des Stickstoffsensors müsste detaillierter untersucht werden. Die Annahmen zu den Transportentfernungen sind bisher beispielhaft und könnten nach der Verteilung von Ackerflächen berechnet werden. Die Betrachtung anderer Feldfrüchte (z. B. Raps, Gerste, Mais) wäre wichtig, um die Thematik umfassend beurteilen zu können. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Pflanzen erfordert weitere Untersuchungen, da bei diesen z. B. das Vorgehen bei der Düngung abweichen kann oder mit einem anderen Düngerverbrauch einhergeht, beispielsweise bei Hafer oder Wintergerste.

Es wird empfohlen, weitere Technologien der Intelligenten Landtechnik hinsichtlich ihres Ressourceneinsparungspotenzials zu untersuchen. Beispielsweise können Parallelfahrssysteme Überlappungen und Fehlstellen verringern, wodurch der Einsatz von überflüssigem Dünger, Saatgut oder Pflanzenschutzmitteln verringert werden könnte (geo-konzept 2009).

15.6 Quellenverzeichnis

- Agricon (2010): Effekte – Ertrag, <http://www.agricon.de/de/produkte/yara-n-sensor/effekte/effekte-ertrag/>, letzter Zugriff am 12.5.2010
- Agricon (2010): Yara N-Sensor, <http://www.agricon.de/de/produkte/yara-n-sensor>, letzter Zugriff am 10.6.2010, 2010a
- Deutscher Bauernverband (Hrsg.) (2009): Situationsbericht 2010, Trends und Fakten zur Landwirtschaft; Berlin; S. 98.
- Doleschel, P.: Getreide- und Maisanbau in: Die Landwirtschaft – Pflanzliche Erzeugung; München: BLV Buchverlag GmbH & Co KG (Hg.)
- geo-konzept (Hg.) (2009). Leitfaden für GPS und Parallelführung; geo-konzept: adelschlag.
- Hanns, B. (2010): YARA N-Tester und YARA N-Sensor; Jahna: Agricon; verfügbar auf: <http://www.agricon.de/de/unternehmen/downloads/produkte>, 2009, letzter Zugriff am 10.06.2010.
- Hanns, B. (2010): Mündliche Informationen, Firma Agricon, Jahna.
- Hege, U.; Peretzki, F. (2006): Pflanzenernährung und Düngung; in: Die Landwirtschaft – Pflanzliche Erzeugung, 12. Auflage. BLV-Buchverlag, München.

- ITADA (Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique). Abschlussbericht: ITADA-Projekt 5. Winterweizen: Entwicklung einfacher Stickstoffbilanzierungsmethoden zur Bestimmung des Stickstoffeinsatzes im Weizenbau unter Berücksichtigung des Standortpotenzials; <http://www.itada.org/download.asp?id=05bdL.pdf>, 1996, letzter Zugriff am 10.06.2010
- Krieger, A. (2010): Informationen auf Anfrage per E-Mail, Firma Agricon, Jahna.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) (Hg.) (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 13. Auflage.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) (Hg.) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 14. Auflage.
- Lettenmeier, M.; Rohn, H.; Liedtke, C.; Schmidt-Bleek, F (2009): Resource productivity in 7 steps, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.
- Moisio, T.; Lähteenoja, S.; Lettenmeier, M. (2008): Tavara MIPS – Kodin tavaroiden luonnonvarojen kulutuksen arviointi (Goods MIPS – Assessing the use of natural resources in household goods. In Finnish). Publications of the National Consumer Research Centre 6/2008
- Oehmichen, J. (Hrsg.) (2000): Lehrbuch des Pflanzenbaus, Band 1: Grundlagen; Bonn: Agroconcept.
- Proplanta. Sensoren steuern Düngestreuer bedarfsgerechter, http://www.proplanta.de/Agrar-Nachrichten/agrar_news_themen.php?SITEID=1140008702&Fu1=1230861822, 2.1.2009, letzter Zugriff am 10.06.2010
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Schimanski, L. (2010): Ressourceneffizienzpotenziale der Intelligenten Landtechnik am Beispiel des Einsatzes von Stickstoffsensoren bei der Düngung. Bachelorarbeit, Technische Universität München / Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb sowie Technische Universität Berlin / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb.
- Yara. N-Sensoren im Vergleich, http://www.goodsoil.de/Web_GoodSoil/Web_Pflanzensensor/pdf/N-Sensoren_im_Vergleich.pdf, letzter Zugriff 10.06.2010

16 Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der Verkehrssysteme am Beispiel des Güterverkehrs in Deutschland

Cengizhan Aydin (Universität Stuttgart / Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement)

Benjamin Kuhrke (TU Darmstadt/ Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen)

Michael Lettenmeier (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie)

16.1 Einleitung

Der Verkehrssektor impliziert neben Bauen und Wohnen sowie Ernährung den größten Ressourcenverbrauch. In vielen Untersuchungen wird auf die Wechselwirkung zwischen der Wirtschafts- und Verkehrsentwicklung hingewiesen. Einige Experten sehen den Güterverkehr als Grundvoraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft (Bühler 2006). Entsprechend dem Wirtschaftswachstum wächst auch der Güterverkehrssektor nach wie vor. In dieser Arbeit wurde im Bereich des Güterverkehrs der Ressourcenverbrauch der Verkehrsmittel und ihrer Infrastruktur ermittelt und das Ressourceneinsparpotenzial ausgewählter Verbesserungsansätze quantifiziert und evaluiert.

16.2 Vorgehensweise

Mit Hilfe des MIPS-Konzeptes und der ermittelten Daten wurden die Verkehrssysteme in ihrem Ressourcenverbrauch zunächst verglichen. Im nächsten Schritt wurde anhand ausgewählter Optimierungsansätze aufgezeigt, welche Potenziale zur Senkung des Ressourcenverbrauches der jeweiligen Verkehrssysteme vorhanden sind.

16.2.1 Untersuchte Systeme

In dieser Arbeit wurden der Straßengüterverkehr (Volvo FH12 + Anhänger), der Schienengüterverkehr (Dieselgüterzug/Elektrogüterzug auf Basis Lok RE 460 + 20 Güterwägen), der Binnenschiff Güterverkehr (Binnenschiff) und der Luftgüterverkehr (Frachtflugzeug Inland) untersucht.

Tab. 43: Daten der untersuchten Verkehrsmittel

	Lkw	Diesel-/Elektrogüterzug	Binnenschiff	Frachtflugzeug
Fahrleistung	1.000.000 km	1.250.000 km	1.410.000	55.875.000 km
Max. Kapazität	21 t	1.160 t	675 t	20 t
Auslastung	60%	37%	50%	60%
Verbrauch	0,31 l/km (0,258 kg/km)	Diesel: 175,04 MJ/km (4,09 kg/km) Strom: 59,47 MJ/km (16,53 kWh/km)	287,08 MJ/km (6,71 kg/km)	215,63 MJ/km (4,96 kg/km)
Quellen	Lkw: (Volvo 2001) Anhängers: (Pusenius 2005)	Rohmaterial: (Knörr 2008a) Herstellung: (Pusenius 2005) Wartung: (Pusenius 2005) Verbrauch: (Knörr 2008a)	Rohmaterial: (Knörr 2008a) Herstellung: (Lampatzer 2000) Wartung: eigene Berechnung Verbrauch: (Knörr 2008a)	Rohmaterial: (Knörr 2008a) Herstellung: (Nieminen 2005) Wartung: (Nieminen 2005) Verbrauch: (Knörr 2008a)

Tab. 44: Daten zur Verkehrsinfrastruktur

	Autobahn	Schiene	Wasserstraße, Hafen	Flughafen
Untersuchungsgegenstand	A5, A8, A81	Mannheim-Weil, Ulm-Lindau, Ravensburg-Pfullendorf	westdeutsche Wasserstraßen und Häfen	Flughafen Helsinki
Lebensdauer	Erbau: 116a Oberbau: 35a Kunstabau: 70a Ausrüstung: 20a	Unterbau: 116a Oberbau: 20-90 a Kunstabau: 70 a Ausrüstung: 18a	Wasserstraßen: 10-124 a Hafen: 28-124 a	Flughafen: 100a
Allokation der Aufwendungen	Formel aus (Lampatzer 2000)	Nach Trassenkilometern ³³ (25% Güterverkehr)	100% Güterverkehr	1 Pkm = 0,1 tkm
Quellen	(Lampatzer 2000)	(Lampatzer 2000)	(Stiller 1995)	(Nieminen 2005)

16.2.2 Definition der Service-Einheit

In dieser Studie bezieht sich der Materialinput der jeweiligen Verkehrssysteme auf einen Tonnenkilometer, also den Transport einer Tonne Material über eine Strecke von einem Kilometer (kg/tkm).

16.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Bei den Verkehrsmitteln wurden die Rohmaterialien, die benötigte Energie zur Herstellung, der Material-, Energie- und Wasserverbrauch bei der Wartung sowie der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch in der Nutzungsphase berücksichtigt. Es wurden keine

³³ Zurückgelegte Kilometerstrecke der Züge

Umschlagsplätze analysiert (ausgenommen Binnenhafen und Flughäfen). Auch Brücken und Tunnels wurden bei Autobahnen und Schienenstrecken berücksichtigt.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Der Lkw benutzt für den Transport lediglich Autobahnen und Bundesstraßen.
- Die Autobahnen, Bundesstraßen und Schienenstrecken in Baden-Württemberg repräsentieren den Ressourcenverbrauch für Deutschland.
- Die Aufwendungen einer eingleisigen elektrifizierten Strecke entsprechen der eingleisigen nicht elektrifizierten Strecke zuzüglich der Hälfte der Aufwendungen für Aluminium und Kupfer der zweigleisigen elektrifizierten Strecke.
- 60% der Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs wird mit Dieseltourzügen geleistet.
- Die westdeutschen Wasserstraßen und Häfen repräsentieren den Ressourcenverbrauch für Deutschland.
- Für die Wartung des Binnenschiffes werden 15% des Schiffmaterials und 50% der Gummiteile für eine Generalüberholung verrechnet. Es wird von 2 Generalüberholungen ausgegangen.
- Der Flughafen Helsinki entspricht dem Flughafen Frankfurt. Für die übrigen 25 deutschen Flughäfen wird mit 2 Start-/Landebahnen gerechnet.
- Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass an den 26 Flughäfen eine entsprechende Anzahl an technischen Bereichen und Gebäuden für Wartung der Flugzeuge notwendig ist.
- Als Kraftstoff verbraucht das Flugzeug Diesel statt Kerosin.
- Der Transport der Rohmaterialien für die Verkehrsmittel wird nicht berücksichtigt.
- Verkehrsmittel und Verkehrsinfrastruktur besitzen keine Rückbauphasen.
- Abstellplätze für Verkehrsmittel werden nicht berücksichtigt. Lediglich beim Frachtflugzeug wurde ein Hangar berücksichtigt.

16.2.4 Datenerfassung

Zunächst wurden die Aufwendungen für die Verkehrsmittel ermittelt. Hierzu wurden Herstellerangaben (Volvo 2001), vorhandene deutsche Studien (Knörr 2008a) und Daten aus dem finnischen Projekt FIN-MIPS Transport-Projekt (Lähteenoja 2006) verwendet. Anschließend wurden die Aufwendungen für Bau, Betrieb und Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur ermittelt. Grundlegende Literaturquellen waren deutsche Studien (Lampatzer 2000) und (Stiller 1995). Lediglich bei der Analyse des Flughafens wurde auf einen finnischen Bericht zurückgegriffen. Nach Ermittlung der Aufwendungen für die Infrastruktur wurden diese mit Hilfe der festgelegten Allokationen den Verkehrsmitteln zugerechnet.

Es zeigte sich, dass die Auslastung, der Kraftstoff- und Energieverbrauch der Verkehrsmittel sowie die Aufwendungen für die Infrastruktur wichtige Einflussfaktoren auf

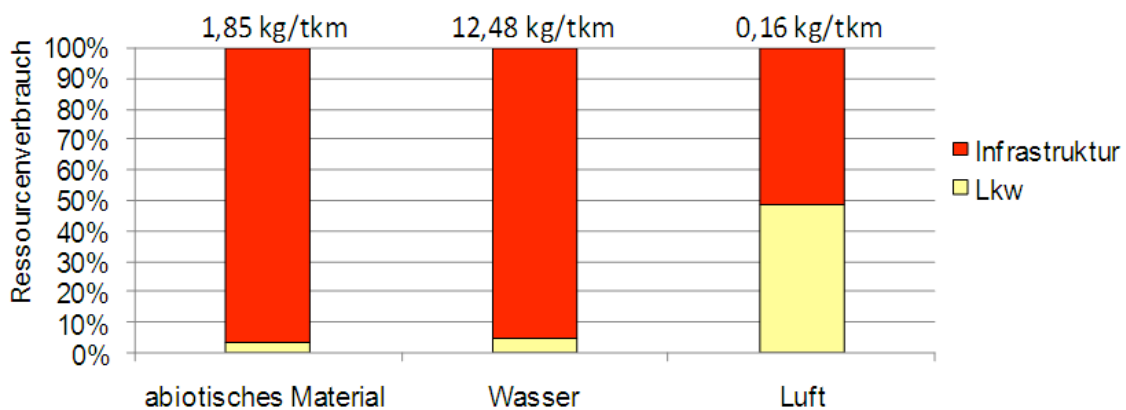
den Ressourcenverbrauch sind. Daher wurden Optimierungsansätze zu diesen Themen untersucht, welche in den Studien (Knörr 2008a), (Knörr 2008b), (Kämpf 2001) und (UBA 2003) genannt sind.

16.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Mit Hilfe der ermittelten Daten und der vorgelagerten Stoffströme nach dem MIPS-Konzept wurde der Ressourcenverbrauch der Verkehrssysteme berechnet.

16.3.1 Ressourcenverbrauch des Lkw-Fernverkehrs

Abb. 53: Ressourcenverbrauch Lkw gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 60% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels



Quelle: Aydin 2010

In den Kategorien abiotisches Material und Wasser spielen die Aufwendungen für die Infrastruktur eine wichtigere Rolle als für den Lkw. Dies ändert sich aber für die Kategorie Luft. Der Kraftstoffverbrauch ist in dieser Kategorie genauso entscheidend (s. Abb. 53). Der Ressourcenverbrauch des Lkw beträgt ohne Infrastruktur 56,5 g/tkm abiotisches Material, 626,5 g/tkm Wasser und 90,7 g/tkm Luft. Hier wird in der Nutzungsphase am meisten abiotisches Material und Luft verbraucht. Dies liegt vor allem am benötigten Kraftstoff Diesel. Das meiste Wasser wird für die Rohmaterialien, also für die Herstellung des Lkw benötigt. Ursache ist der hohe Stahl- bzw. Eisen- und Aluminiumanteil.

16.3.2 Ressourcenverbrauch des Schienengüterverkehrs

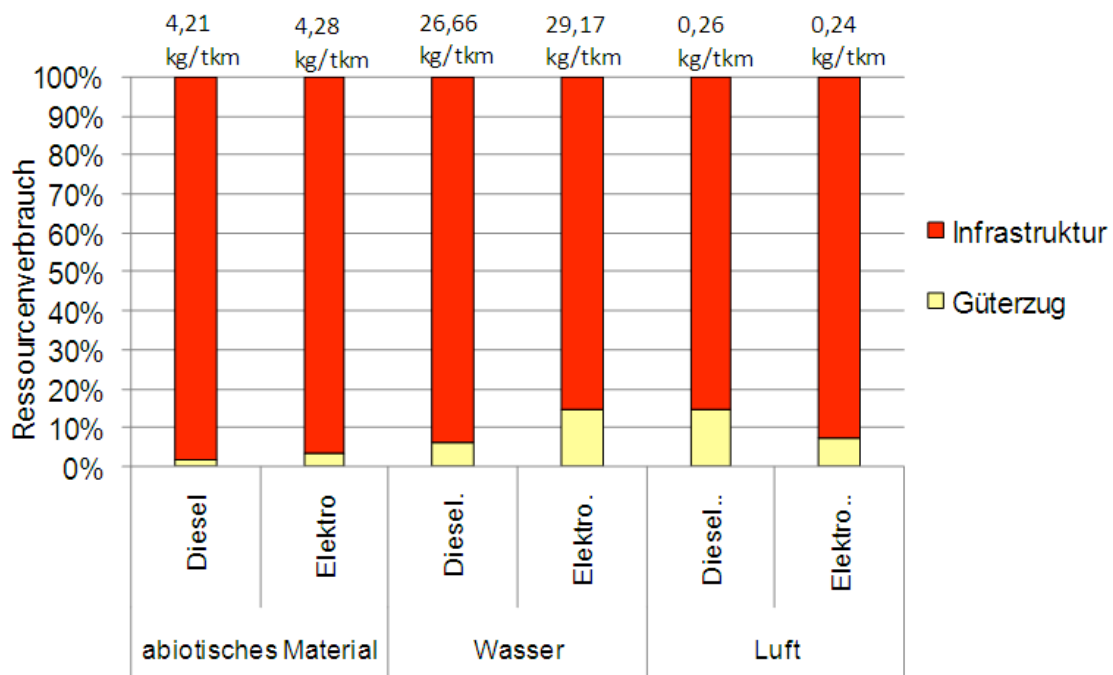
In Anlehnung an (Knörr 2008a) wurde bei der Berechnung des Ressourcenverbrauches zwischen einer diesel- und einer strombetriebenen Lok unterschieden.

Es wurden die Aufwendungen der verschiedenen Streckentypen berechnet und über die entsprechend in Deutschland vorhandenen Streckenlängen ein Mittelwert bestimmt.

Im nächsten Schritt wurde die Allokation zwischen Personenverkehr und Güterverkehr vorgenommen. Hierzu wurde mit Hilfe der Betriebsleistung der jeweilige Anteil ermittelt. Die Betriebsleistung im Personenverkehr betrug 2008 laut (DB DatenFakten 2009) etwa 687,2 Mio. Trassenkilometer (74,70%). Für dasselbe Jahr verzeichnete der Güterverkehr eine Leistung von etwa 232,7 Mio. Trassenkilometer (25,30%). Aus diesem Grund wurden 25,30% der Aufwendungen für die gesamte deutsche Schieneninfrastruktur dem Güterverkehr zugerechnet. Anschließend wurden die Aufwendungen für die Infrastruktur auf die Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs bezogen.

Für die beiden Zugtypen ergeben sich letztlich folgende MIPS Werte. Sie beinhalten den benötigten Ressourcenverbrauch für eine Lok mit 20 Güterwagons und für die Schieneninfrastruktur.

Abb. 54: Ressourcenverbrauch Güterzüge gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 37% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels



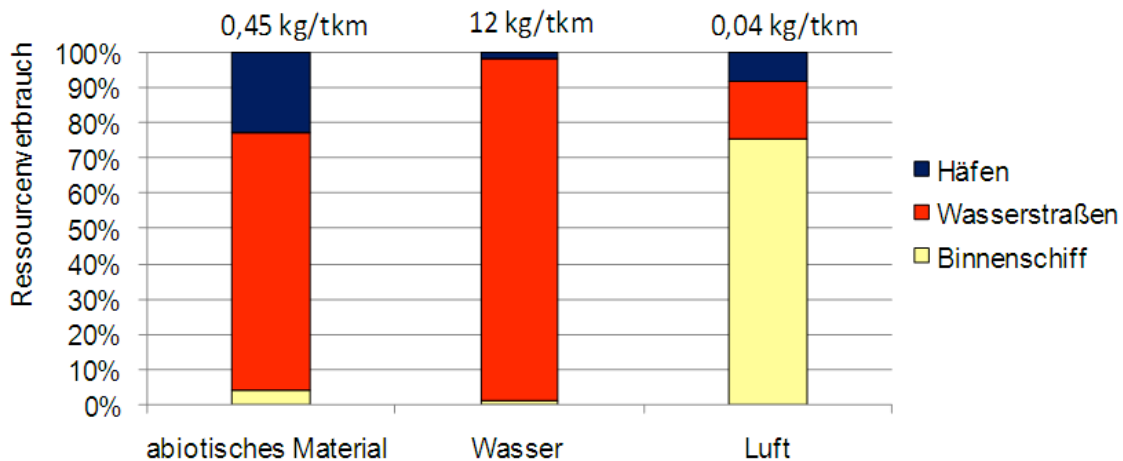
Quelle: Aydin 2010

Der Großteil des Ressourcenverbrauches entsteht wieder aufgrund der Infrastruktur. Der Dieselt Güterzug allein benötigt bei einer Auslastung von 37 % lediglich 76,5 g/tkm abiotisches Material, 1.694,1 g/tkm Wasser und 37,7 g/tkm Luft. Anders als beim Lkw ist die Wartung in den Kategorien abiotisches Material und Wasser relevant. Auch hier ist der Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase für die Kategorie Luft bestimmend. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Elektrogüterzug. Die Infrastruktur ist wieder der entscheidende Faktor beim Ressourcenverbrauch. Schaut man sich den Ressourcenverbrauch lediglich für das Verkehrsmittel Elektrogüterzug an, ergeben sich Werte von 151,6 g/tkm abiotisches Material, 4.205,0 g/tkm Wasser und 17,5 g/tkm Luft. In allen drei Kategorien werden in der Nutzungsphase am meisten Ressourcen verbraucht.

16.3.3 Ressourcenverbrauch des Binnenschifftransports

Die MIPS-Werte für die Wasserstraßen wurden (Stiller 1995) entnommen. Abweichend hierzu wurde die Erdbewegung in der Kategorie abiotisches Material hinzugerechnet. Allerdings bezog (Stiller 1995) die Materialinputs für die Häfen nur auf den Umschlag. Daher mussten die Werte für die Häfen auf die festgelegte Service-Einheit Tonnenkilometer umgerechnet werden. Die Aufwendungen für Bau, Betrieb und Instandsetzung wurden vollständig dem Güterverkehr zugerechnet. Grund hierfür ist die geringe Bedeutung des Personenverkehrs mit Schiffen (Stiller 1995). Mit den getroffenen Annahmen ergeben sich für den Transport von Gütern per Binnenschiff auf westdeutschen Wasserstraßen folgende MIPS-Werte.

Abb. 55: Ressourcenverbrauch Binnenschiff gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 50% und Anteile der Wasserstraßen, Häfen und des Verkehrsmittels



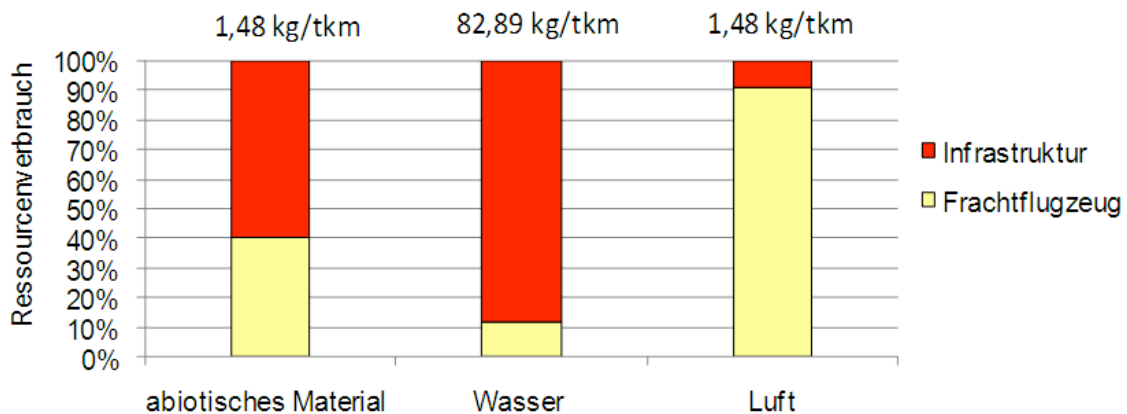
Quelle: Stiller 1995, Aydin 2010

Es zeigt sich auch hier, dass die Infrastruktur eine entscheidende Rolle besitzt. Der Wasserverbrauch kommt hauptsächlich durch den Wasserverbrauch der Kanäle zustande. Das Verkehrsmittel ist lediglich in der Kategorie Luft von Relevanz. Es benötigt 17,9 g/tkm abiotisches Material, 135,0 g/tkm Wasser und 32,3 g/tkm Luft.

16.3.4 Ressourcenverbrauch der Luftfracht

In dieser Studie wurde ein Frachtflugzeug betrachtet, das lediglich im Inland Güter transportiert. Nach Zusammenfassung der MIPS-Werte des Frachtflugzeuges und der Infrastruktur ergeben sich die im Folgenden dargestellten MIPS Werte.

Abb. 56: Ressourcenverbrauch Frachtflugzeug gesamt bei einer durchschnittlichen Auslastung von 60% und Anteile der Infrastruktur und des Verkehrsmittels



Quelle: Aydin 2010

In den Kategorien abiotisches Material und Wasser hat die Infrastruktur einen großen Einfluss. Jedoch bewirkt die Nutzung des Frachtflugzeugs einen hohen Verbrauch in den Kategorien abiotisches Material und Luft. Das Frachtflugzeug allein benötigt 598,8 g/tkm abiotisches Material 9.931,1 g/tkm Wasser und 1.350,1 g/tkm Luft. Über alle drei Kategorien hinweg wird in der Nutzungsphase des Frachtflugzeuges am meisten Ressourcen benötigt. Auffallend hoch sind die Werte in den Kategorien Wasser und Luft.

16.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Es wurden drei Themengebiete zur Reduzierung des momentanen Ressourcenverbrauchs der Verkehrssysteme untersucht und die in Tab. 45 und Tab. 46 dargestellten Maßnahmen identifiziert und quantifiziert.

Tab. 45: Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs im Güterverkehr

	Telematiksystem- Lkw-Flottenmanagement	Kraftstoff- u. Energieverbrauch	Reduzierung der Straßenbreite
Maßnahmen	Zentrale Fahrzeugdisposition und Routenplanung; Fahrzeugverfolgung, Zielführung	Reduktion des Luft- u. Rollwiderstandes, Verbesserung des Auftriebes u. Antriebes; (s. Tab. 46)	Reduzierung der Fahrbahnbreite auf Autobahnen um 2 Meter, bei Bundesstraßen um 1m
Ziel	Bessere Abwicklung des Gütertransports; Optimierung der Tourenplanung durch Rückfrachtannahme und Zusammenführung von Teilladungen	Minderung des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauches der Verkehrsmittel	Reduzierung der Aufwendungen für Bau und Instandhaltung
Auswirkung	Erhöhung der Auslastung des Lkw um 5% auf eine durchschnittliche Auslastung von 63%	Verbrauchsminderung zwischen 2 und 20% (s. Tab. 46)	Reduzierung des Ressourcenverbrauches bei Autobahnen um 8,69% und bei Bundesstraßen um 13,33%
Quellen	(Kämpf 2001)	(Knörr 2008a); (Knörr 2008b)	(UBA 2003), (Ulbricht 2006)

Nach Einführung aller Maßnahmen ergeben sich letztlich folgende neuen MIPS-Werte für die Verkehrssysteme (s. Tab.4).

Tab. 46: Quantifizierung der Maßnahmen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs im Güterverkehr und Vergleich des Ressourcenverbrauchs vor und nach Einführung der Maßnahmen

Verkehrsmittel	Maßnahme	Reduktion	abiotisches Material (kg/tkm)		Wasser (kg/tkm)		Luft (kg/tkm)	
			vor	nach	vor	nach	vor	nach
Lkw	EURO 5-Norm (bereits eingeführt)	4% Kraftstoff	1,846	1,562	12,484	10,570	0,185	0,154
	Motorenoptimierung	4% Kraftstoff						
	Leichtlauföle	3% Kraftstoff						
	Minderung des Rollwiderstandes	7% Kraftstoff						
	stufenloses Getriebe	2,3% Kraftstoff						
	Telematiksysteme für Lkw-Flottenmanagement	5% höhere Auslastung						
	Reduzierung der Straßenbreiten	B um 1m, AB um 2m						
Diesellok	optimierte Wagenanordnung	10% Kraftstoff	4,207	4,204	26,657	26,640	0,257	0,251
	Re-Motorisierung	10% Kraftstoff						
E-Lok	optimierte Wagenanordnung	10% Energie	4,282	4,264	29,168	28,647	0,237	0,234
	Verbesserung bei Transformatoren, Motoren, Kondensatoren und Energiespeichertechnik	10% Energie						
Binnenschiff	Luftschmierung (Luftblasen unterhalb des Schiffes)	20% Kraftstoff	0,445	0,444	12	11,998	0,043	0,042
Frachtflugzeug	Laminarhaltung (turbulenzfreie Umströmung)	20% Kraftstoff	1,480	1,278	82,891	81,449	1,484	1,005
	Wärmeaustauscher im Abgasstrahl	20% Kraftstoff						

Quelle: Aydin 2010

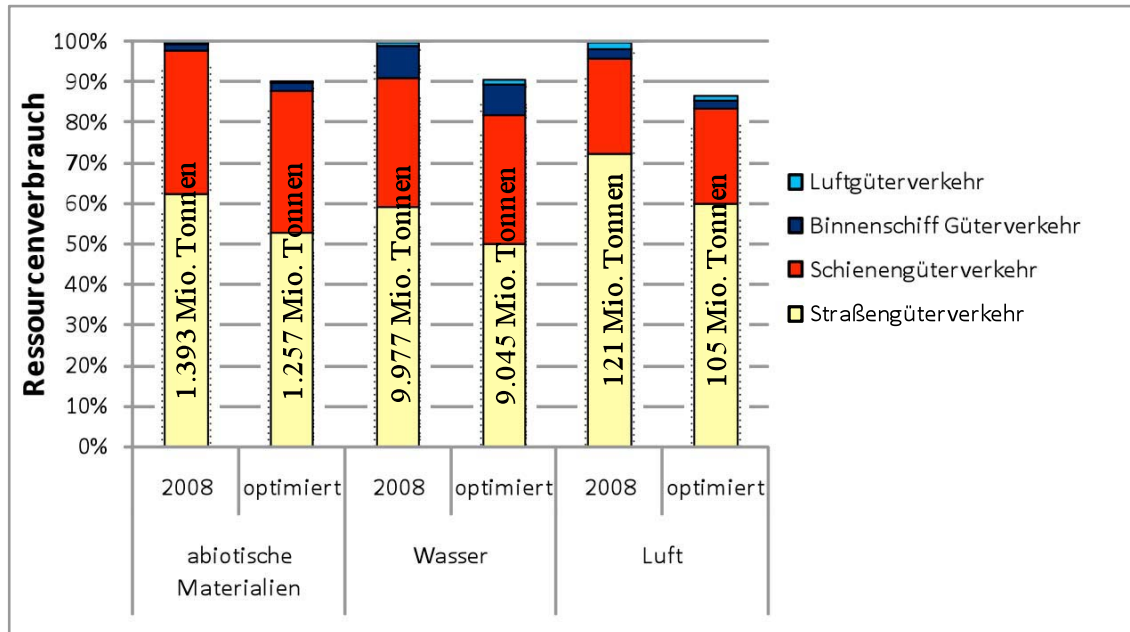
Bei den Verbrauchsminderungsmaßnahmen verringert sich der Ressourcenverbrauch des Verkehrsmittels lediglich in der Nutzungsphase, da es den untersuchten Quellen zufolge zu keinen wesentlichen Veränderungen in der Materialzusammensetzung der Verkehrsmittel kommt. Bei den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Maßnahmen gleichzeitig eingeführt werden können ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Für eine Verkleinerung der Fahrbahnbreite muss zwangsläufig die Fahrgeschwindigkeit herabgesetzt werden. Durch diese Maßnahme könnte beim Bau neuer Straßen der

Ressourcenverbrauch gesenkt werden. Auf eine längere Zeit betrachtet sinken auch die Aufwendungen für die Instandhaltung der Straßen.

Die Einsparpotenziale auf Basis der Verkehrsleistungen in 2008 sind in Abb. 57 dargestellt.

Abb. 57: Einsparpotenziale auf Basis des Jahres 2008 durch Einführung der Maßnahmen



Quelle: Aydin 2010

Mit den beschriebenen Maßnahmen wäre es möglich, ca. 136 Mio. Tonnen abiotisches Material, ca. 932 Mio. Tonnen Wasser und ca. 16 Mio. Tonnen Luft zu sparen. Prozentual gesehen kann in der Kategorie Luft mit etwa 13% die größte Einsparung erzielt werden. In den beiden anderen Kategorien ist eine Einsparung von jeweils etwa 9% möglich.

16.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Es zeigt sich, dass die Infrastruktur sehr viele Ressourcen verbraucht, bisher aber wenig Vorschläge zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bereich Infrastruktur vorhanden sind. Bei den untersuchten Infrastrukturen konnte lediglich bei Autobahnen und Bundesstraßen eine Möglichkeit gefunden werden, die es ermöglicht Ressourcen zu schonen. Dieser Vorschlag des Umweltbundesamts wurde jedoch bisher nicht realisiert. Da die relativ hohen Werte insbesondere für den spezifischen abiotischen Ressourcenverbrauch des Schienengüterverkehrs auf die relativ schwache Auslastung des Schienennetzes zurückzuführen sind, sollten auch hier Maßnahmen zur effizienteren Nutzung des Gesamtnetzes entwickelt werden.

Betrachtet man die Verkehrsmittel, sehen viele Experten ein großes Potenzial in den Telematiksystemen. Durch diese Technologie ist es möglich, vor allen bei den Lkw die Auslastungen zu erhöhen. Dies geschieht vorwiegend dadurch, dass ineffiziente Leer-

fahrten reduziert werden können. Damit könnte auch der Infrastrukturbedarf reduziert werden.

Eine Voraussetzung zur Nutzung von Telematiksystemen ist, dass Unternehmen beim Planen der Transporte zusammenarbeiten müssen, um die Kapazitäten ihrer Fahrzeuge besser nutzen zu können. Dabei müsste ein Weg gefunden werden, der die Unternehmen nicht in die Lage bringt, strategisch wichtige Informationen mit der Konkurrenz teilen zu müssen.

Bei den vorgeschlagenen Verbrauchsminderungstechnologien sind Potenziale in kleinen Größenordnungen vorhanden. Der Konkurrenzdruck bei den Herstellerunternehmen der Lkw sorgt stetig für eine Reduzierung des Treibstoffverbrauches. Jedoch lag das Durchschnittsalter der Lkw im Jahr 2007 bei etwa 8 Jahren. Dies zeigt, dass die hiermit verbundenen hohen Investitionen für neue Fahrzeuge für die Speditionsunternehmen ein Hindernis zur Nutzung der mit neuen Lkw verbundenen Potenziale darstellen können.

Der Vergleich der Verkehrsträger untereinander ist nicht uneingeschränkt möglich, da die verwendeten MI-Daten im relevanten Bereich Sand und Kies bei Straße und Schiene höhere Werte liefern als bei Schiff und Luft, allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht angepasst werden konnten. Vor allem die abiotischen MIPS-Werte beim Schienenverkehr erscheinen hoch. Jedoch muss beachtet werden, dass die untersuchten Schienenstrecken sich auf Baden-Württemberg beziehen. Hier ist sicherlich der Tunnel- und Brückenanteil, die hier etwa 50% der Aufwendungen für die Infrastruktur ausmachen, im Vergleich zu Deutschland höher. Daher müssten die Schienenstrecken anhand einer umfangreicheren Analyse für Gesamtdeutschland näher betrachtet werden.

Bei elektrisch betriebenen Güterzügen würde die Umstellung der Stromquelle auf erneuerbare Energien den Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase deutlich senken, da Strom aus erneuerbaren Energiequellen deutlich weniger ressourcenintensiv ist (vgl. Wiesen 2010). Diese Maßnahme wurde jedoch in der betrachteten Literatur nicht vorgeschlagen und daher hier nicht im Einzelnen quantifiziert. Anhand Tab. 47 werden die untersuchten Maßnahmen diskutiert.

Tab. 47: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Maßnahmen nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Telematiksystem – Lkw-Flottenmanagement	Kraftstoff- u. Energieverbrauch	Reduzierung der Straßenbreite
Ressourceneinsatz	Gering, da notwendige Gebäude und Technologien schon vorhanden sind	Verbesserungen der vorhandenen Techniken benötigen meist weniger Material. Es werden jedoch auch ressourcenaufwendigere Materialien verwendet.	Die Reduzierung der Straßenbreiten kann den Ressourcenaufwand der Infrastruktur deutlich senken.
Ressourceneffizienzpotenzial	Potenziale sind vorhanden, jedoch wirken sie nur, wenn mehr als 75% der Lkw eines Unternehmens mit diesem System ausgestattet sind.	Potenziale sind in den Verkehrssystemen in unterschiedlichem Ausmaß vorhanden.	Es kann nicht nur die Fahrbahn der Autobahnen sondern so gut wie aller Straßentypen reduziert werden, allerdings greift die Maßnahme v.a. beim Neu- und Umbau.
Sonstige Umweltauswirkungen	Ähnliche Effekte wie beim Ressourcenverbrauch.	Reduzierung der Schadstoff- und CO ₂ -Emissionen.	Weniger bzw. langsamer ansteigende Flächenversiegelung.
Realisierbarkeit	Tourenplanungssysteme werden derzeit im Werkverkehr eingesetzt. Technologie ist bereits vorhanden. Unternehmen sind nicht bereit Firmeninterne Daten, die für das System notwendig sind mit der Konkurrenz zu teilen.	Hersteller der Verkehrsmittel besitzen die notwendigen Technologien und diese sind bereits in neuen Verkehrsmitteln teilweise realisiert. Eine Remotorisierung bei Zügen und Binnenschiffen ist günstiger als ein Neukauf.	Beim Neu- und Umbau realisierbar, aber reduzierte Geschwindigkeiten sind eine Frage politische Durchsetzbarkeit. Für einen Rückbau sind die Aufwendungen hoch.
Wirtschaftliche Bedeutung	Flottenmanagement kann dafür sorgen, dass die Teilnahme an einer Frachtenbörse unnötig wird. Telematiksysteme werden als ein wichtiges Thema für die bessere Nutzung der vorhandenen Straßenkapazitäten gesehen.	Bei Herstellern hoher Innovations- bei Nutzern hoher Investitionsbedarf. Beide können durch Senkung des Kraftstoffverbrauchs ihre Marktposition stärken.	Geringere Baukosten beim Neu- und Umbau.
Kommunizierbarkeit	Die Nutzerakzeptanz ist noch gering, da das Nutzen/Kosten-Verhältnis nicht klar ist. Flexibilität bei kurzfristigen Veränderungen wäre ein wichtiger Faktor zur besseren Akzeptanz.	Transportfirmen sind aufgrund der Wirtschaftskrise nur eingeschränkt zu Investitionen fähig.	Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen politisch umstritten.
Übertragbarkeit	Telematiksysteme sind auch bei Güterzügen und Binnenschiffen einsetzbar, Potenziale verstärken sich dadurch.	Eine Übertragbarkeit auf den Personenverkehr ist teilweise vorhanden. Jedoch sind die Potenziale im Personenverkehr in ihrer Höhe nicht dieselben.	Übertragung auf Kreis- und Landesstraßen ist vorhanden. Im innerörtlichen Bereich könnte bei einer Änderung von Tempo 50 auf 30 die Straßenbreiten auf Kreisstraßen um 0,40m und auf Landstraßen um 0,44m reduziert werden.

Quelle: Aydin 2010

Die Finanz- und Wirtschaftskrise hat den Güterverkehr stark getroffen. Viele Transportfirmen kämpfen um ihre Existenz. Jedoch ist der Güterverkehr ein wichtiger Standortfaktor für Deutschland. Beachtet man das stetige Wachstum der Güterverkehrsleistung, scheint es nicht möglich zu sein, allein durch den Straßengüterverkehr diese Mengen zu bewältigen. Die vorhandenen Kapazitäten bei den Binnenschiffen wären hier eine mögliche Ausweichmöglichkeit. Viele Städte in Deutschland sind per Binnenschiffe zu erreichen. Binnenschiffe wären für lange Strecken eine ressourcenschonende Alternative zu den Lkw.

Um die schon vorhandenen Potenziale in neuen Lkw nutzen zu können, müsste die Politik die Speditionsunternehmen finanziell unterstützen. Dies könnte z.B. Über eine Abwrackprämie für Transporter und Lkw erfolgen, denn das Durchschnittsalter der Lkw ist höher als bei Pkw. Diese Maßnahmen hätten allerdings keinen Einfluss auf den ausländischen Lkw-Verkehr in Deutschland. Desweiteren könnte die Politik die Durchführung von Eco-Drive-Kursen für Lkw-Fahrer fördern. So könnten die Lkw-Fahrer eine energiesparende Fahrweise lernen und die Umwelt besser schonen.

Grundsätzlich wären die bessere Auslastung der vorhandenen und die Verringerung des Neu- und Ausbaubedarfs von Verkehrsinfrastruktur entscheidende Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Verkehrssektor.

16.6 Quellenverzeichnis

- Aydin, C. (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der Verkehrssysteme am Beispiel des Güterverkehrs in Deutschland. Universität Stuttgart, Studienarbeit.
- Bühler, G. (2006): Verkehrswahl im Güterverkehr. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Deutsche Bahn DB Mobility Logistics (2009): Daten & Fakten 2009 Internet: http://www.deutschebahn.com/site/shared/de/dateianhaenge/berichte/daten__und__fakten__2009.pdf; 05.04.2010
- Kämpf, K., Keller, H.; Porgnos AG: Wirkungspotenziale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmittelnutzung, Basel, 2001 Internet: http://www.bmvbs.de/Anlage/original_1000252/Schlussbericht.pdf; 25.03.2010
- Knörr, W.; Kutzner, F. (2008): Verbrauch, Emissionen, Materialeinsatz und Kosten von Binnenschiffen, Flugzeugen und Schienenfahrzeugen. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Internet: http://www.renewbility.de/fileadmin/download/techndatenb_uebrige_verkehrstr.pdf; 29.12.2009
- Knörr, W.; Kutzner, F.: Öko-Institut e.V.; DLR-IVF. Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030 (RENEWBILITY), Arbeitspapier zur Technologiedatenbasis Straßenfahrzeuge Stand August 2008. Berlin, 2008b
- Lähteenoja, S.; Lettenmeier, M.; Saari, A.: The natural resource consumption of the Finnish transport system (FIN-MIPS). Helsinki, 2006
- Lampatzer, R.; Schäfer, F.; Wacker, M.; Fahl, U.; Liebscher, P.; Stekeler, A.; Voß, A.; Sanftleben, D.; Voß, G. (2000): Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) Vergleichende Untersuchung umwelt- und klimarelevanter Wirkungen verschiedener Verkehrsmittel bei Erfüllung ausgewählter Transportaufgabe im Güterverkehr. Internet: <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/PEF494004SBer.pdf>; 31.03.2010

- Link, H.; Kalinowska, D.; Kunert, U.; Radke, S. (2009): Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland im Jahre 2007. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin. Internet: http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.344573.de/diwkompakt_2009-053.pdf; 06.04.2010
- Nieminen, A.; Lettenmeier, M.; Saari, A. Suomen (2005): Luonnonsuojeluliitto r.y; Luonnonvarojen kulutus Suomen lentoliikenteessä (LentoMIPS). Helsinki.
- Pusenius, K.; Lettenmeier, M.; Saari, A. (2005): Suomen luonnonsuojeluliitto. Luonnonvarojen kulutus Suomen tieliikenteessä (TieMIPS). Helsinki.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2), Binnenschiffe. Wuppertal Papers.
- Ulbricht, M. (2006): Stoffströme im Tiefbau, Quantifizierung des Ressourcenverbrauches der deutschen Straßeninfrastruktur. Wuppertal, Universität, Studienarbeit.
- Volvo 2001 Truck Corporation. Environmental product declaration: Volvo FH12 and Volvo FM12, Euro3. Internet: http://www.volvotrucks.com/SiteCollectionDocuments/VTC/Corporate/About%20us/Environment/euro3_03.pdf; 07.01.2010

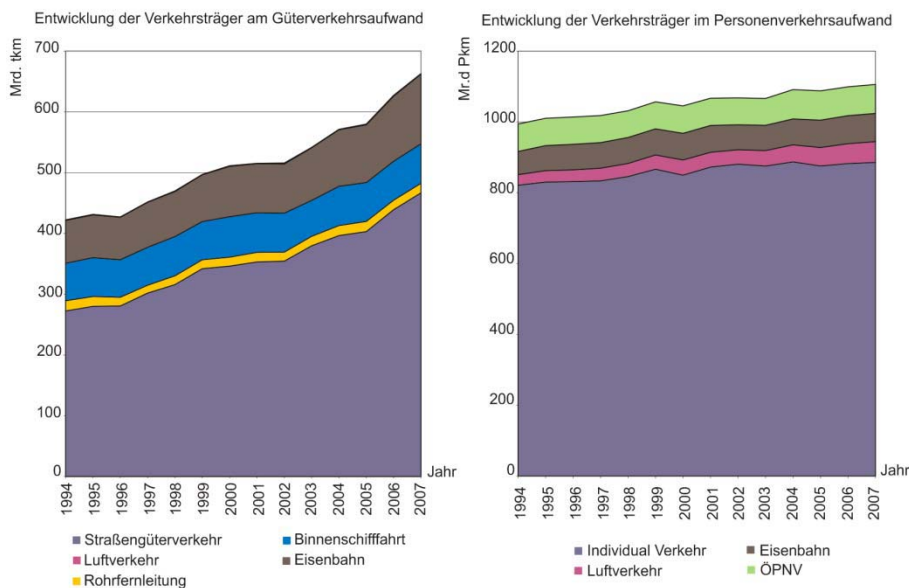
17 Ressourceneffizienzpotenziale von Elektrofahrzeugen

W. Hufenbach, R. Kupfer, P. Lucas, B. Reichardt (Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK))

17.1 Einleitung

Steigende Verkehrsleistungen sowohl im Personen- als auch Güterverkehr sowie eine zunehmende Verstädterung erhöhen die Luftbelastung in Ballungsräumen und dicht besiedelten Gebieten (Abb. 58). Zudem verursacht der Straßenverkehr derzeit etwa 17 % der CO₂-Emissionen Deutschlands (Umweltbundesamt 10). Um die geforderten Klimaschutzziele in den kommenden Jahrzehnten erreichen zu können, wird eine Umstellung des Automobilverkehrs auf überwiegend alternative Kraftstoffe und effizientere Antriebskonzepte derzeit stark gefördert. Der Fokus dieser politischen und wirtschaftlichen Bestrebungen liegt derzeit auf der Entwicklung elektrischer Antriebe für Straßenfahrzeuge als alternatives Konzept zum herkömmlichen Verbrennungsmotor.

Abb. 58: Entwicklung der Verkehrsleistung in Deutschland für Personen- und Güterverkehr



Quelle: Umweltbundesamt 2009

Elektrofahrzeuge gelten momentan als aussichtsreiche Technologie, um Klimaschutz, Energieversorgungssicherheit und die Sicherung der Mobilität in Einklang zu bringen. Einige Vorteile dieser Antriebsart sind lokale Emissionsfreiheit, geringe Lärmbelastungen sowie Unabhängigkeit von erdölbasierten Kraftstoffen. Hinsichtlich der Reduzierung von Treibhausgasen wird der Elektromobilität in Verbindung mit klimafreundlicher Stromerzeugung aus regenerativen Quellen ein hohes Potenzial beigegeben.

Derzeit entwickelte Elektrofahrzeuge basieren zumeist auf aktuellen Serienmodellen, deren konventioneller Antriebsstrang durch die entsprechenden elektrischen Komponenten substituiert wurde. Neben der Entwicklung elektromotorisch betriebener Pkw werden zunehmend auch kommunale Nutzfahrzeuge fokussiert, da diese vornehmlich lokal agieren und aufgrund ihres Einsatzgebietes ein emissionsfreier Betrieb angestrebt wird. Im Rahmen dieser Arbeit soll der lebenszyklusweite Ressourcenverbrauch solcher Automobile anhand eines Fallbeispiels untersucht werden. Ferner werden Ressourceneffizienzpotenziale durch den verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen evaluiert.

17.2 Vorgehensweise

Um die Ressourceneffizienz von Elektrofahrzeugen abzuschätzen, wird auf Basis der MIPS-Methodik der lebenszyklusweite Ressourcenaufwand eines kommunalen Nutzfahrzeuges mit Dieselmotor dem eines elektrisch angetriebenen Entwicklungsfahrzeuges gegenübergestellt.

17.2.1 Untersuchte Produkte

Als Fallbeispiel wird das Nutzfahrzeug *Multicar FUMO* herangezogen, welches derzeit mit dieselmotorischen Antrieb ausgerüstet ist. Am *Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)* erfolgte auf dieser Plattform die Entwicklung eines elektromotorischen Antriebssystems für derartige Fahrzeuge. Der neu konzipierte und entwickelte Antriebsstrang mit allen notwendigen Zusatzaggregaten wurde prototypisch in ein solches Fahrzeug integriert und erfolgreich erprobt. Hierbei wurde der konventionelle Antrieb vollständig substituiert. Anhand dieser beiden Fahrzeugvarianten soll zum einen der zur Herstellung erforderliche Ressourcenaufwand abgeschätzt und zum anderen der lebenszyklusweite Ressourcenverbrauch ermittelt werden. Durch Sensitivitätsanalysen werden ressourcenkritische Einflussfaktoren untersucht und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse bewertet.

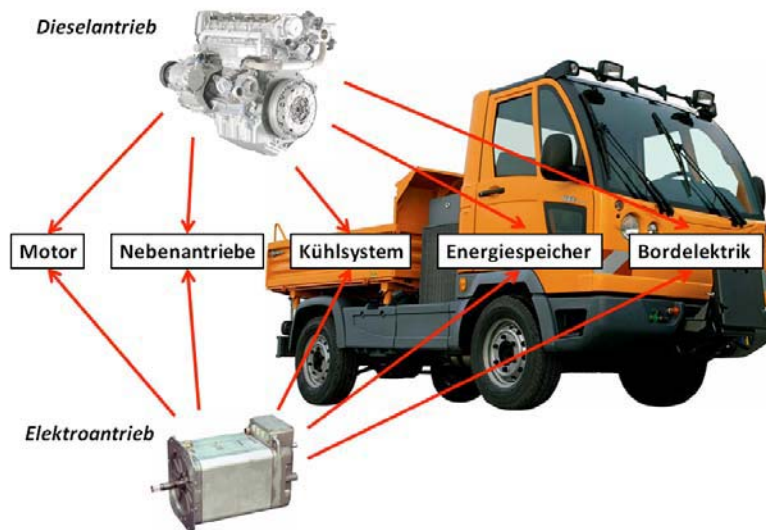
17.2.2 Definition der Service-Einheit

Als Serviceeinheit wird der Transport einer Masse von einer Tonne über die Fahrstrecke von einem Kilometer ausgewählt. Demnach wird die Serviceeinheit als Tonnenkilometer (tkm) bezeichnet.

17.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Da eine Stoffstromanalyse der kompletten Fahrzeuge inklusive aller Vorketten sehr umfangreich ist, werden in dieser Arbeit nur die Baugruppen berücksichtigt, welche in der jeweiligen anderen Fahrzeugvariante nicht vorhanden sind. Somit beschränkt sich die Analyse auf die Fahrzeugteile, die spezifisch für die entsprechende Antriebsart sind (Abb. 59).

Abb. 59: Darstellung der bei Elektrifizierung des Antriebsstrangs modifizierten Baugruppen



Quelle: Multicar, Eigene Darstellung

Die für die Stromstromanalyse geltenden Randbedingungen werden innerhalb der folgenden Systemgrenzen zusammengefasst:

- Antriebsstränge werden ohne das eigentliche Fahrzeug analysiert
- ausschließlich modifizierte Bauteile werden berücksichtigt
- MI-Werte werden anhand der tatsächlich im Fahrzeug vorhandenen Werkstoffmassen berechnet
- die während der Nutzungsphase notwendige Infrastruktur zum Fahrzeugbetrieb bleibt unberücksichtigt
- die Verwertungsphase findet keine Berücksichtigung, da insbesondere für Elektroenergiespeicher (Lithium-Ionen-Akkus) derzeit keine praxisrelevanten Prozesse bekannt und daher keine Daten zur Entsorgung verfügbar sind

Weitere Annahmen zur Berechnung:

- die Lebensdauer eines Nutzfahrzeuges umfasst 300.000 km
- die Reichweite des Batteriesystems beträgt 80 km
- die Lebensdauer der Akkus umfasst 2.000 Ladezyklen
- der dieselmotorisch angetriebene *FUMO* hat einen durchschnittlichen Verbrauch von 15,6 l pro 100 km und einen gemittelten Ölverbrauch von 0,2 % des Kraftstoffbedarfs

Gemäß der definierten Systemgrenzen erfolgt die Datenerfassung für alle vom Umbau betroffenen Bestandteile des Antriebssystems. Über den elektrischen Antrieb liegen am *ILK* aufgrund der Entwicklungstätigkeit detaillierte Informationen in Form von Datenblättern, Produktbeschreibungen und CAD-Modellen vor. Indes konnten für die im Antriebssystem der Dieselvariante verbauten Werkstoffe keine spezifischen Werte er-

hoben werden. Daher wird für die Materialzusammensetzung eines dieselmotorischen Antriebs auf Literaturquellen (Schweimer) zurückgegriffen.

Für die Nutzungsphase spielen einerseits der Diesel- und Stromverbrauch, andererseits der Materialeinsatz für Wartungsarbeiten eine Rolle. Tab. 48 und Tab. 49 zeigen die zu analysierenden Komponenten in den einzelnen Lebenszyklusphasen.

Um den Ressourcenaufwand der Fahrzeuge abzuschätzen, werden die ermittelten Materialmengen mit den MI-Faktoren verknüpft. Für eine Reihe von Werkstoffen werden die MI-Faktoren vom *Wuppertal Institut* zur Verfügung gestellt (Lettenmeier). Da für einige Materialien keine MI-Werte ermittelt werden konnten, wurden diese anteilig mit ihrem Eigengewicht berücksichtigt. Die MI-Faktoren für Metalle mit hohem Recyclinganteil, bspw. Kupfer und Aluminium, werden aus den jeweils üblichen Quoten von Primär- zu Sekundärrohstoffen abgeleitet.

Da insbesondere für den Betrieb des Elektrofahrzeugs ein hoher Stromverbrauch zu erwarten ist, wurde der MI-Faktor für den Strommix aus dem Jahr 2008 neu ermittelt, sowie perspektivisch auf der Basis von Prognosen (Bundesverband Erneuerbare Energie) für das Jahr 2020 abgeschätzt.

Tab. 48: Berücksichtigte Komponenten in der Stoffstromanalyse des Elektroantriebs

Lebenszyklusphase	Komponente	Berücksichtigte Ressourcen
Herstellung	Elektromotor	Material-Input bestehend aus den tatsächlich im Fahrzeug verbauten Materialien.
	Traktionsbatterie	
	Leistungselektronik	
	Verkabelung	
	Kühlsystem	
	Elektrische Lenkunterstützung	
	System zur Bremskraftverstärkung	
Nutzung	Elektrische Energie zur Batterieaufladung	Stromentnahme aus dem öffentlichen Netz und Ladeverluste berücksichtigt.
Wartung	Batteriewechsel	Material-Input einer neuen Batterie

Tab. 49: Berücksichtigte Komponenten in der Stoffstromanalyse des dieselmotorischen Antriebs

Lebenszyklusphase	Komponente	Berücksichtigte Ressourcen
Herstellung	Dieselmotor	Material-Input bestehend aus den tatsächlich im Fahrzeug verbauten Materialien.
	Kühlsystem	
	Kraftstoffanlage	
	Lenkhilfepumpe	
	Generator	
Nutzung	Diesel	Kraftstoff und Verbrennungsluft
Wartung	Ölwechsel	Material-Input für den Ölverbrauch

17.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

17.3.1 Ressourcenverbrauch des elektrogetriebenen FUMO

Sowohl während der Herstellungs- als auch der Nutzungsphase sind deutliche Unterschiede im Ressourcenverbrauch von Elektro- und Dieselantrieb vorhanden. Die Neuentwicklung des elektrischen Antriebsstranges führt zu drastisch veränderten Gewichtsverhältnissen im Fahrzeug. Das Gesamtgewicht der Antriebskomponenten steigt auf 800 kg. Zurückzuführen ist dies vor allem auf das Lithium-Ionen-Batteriesystem, welches mit 560 kg den größten Anteil an der Massesteigerung der Elektrovariante hat. Das verwendete Batteriesystem repräsentiert jedoch den aktuellen Technologiestand wobei signifikante Steigerungen der Kapazität, respektive Senkungen des Eigengewichts der Batterie, derzeit nicht absehbar sind.

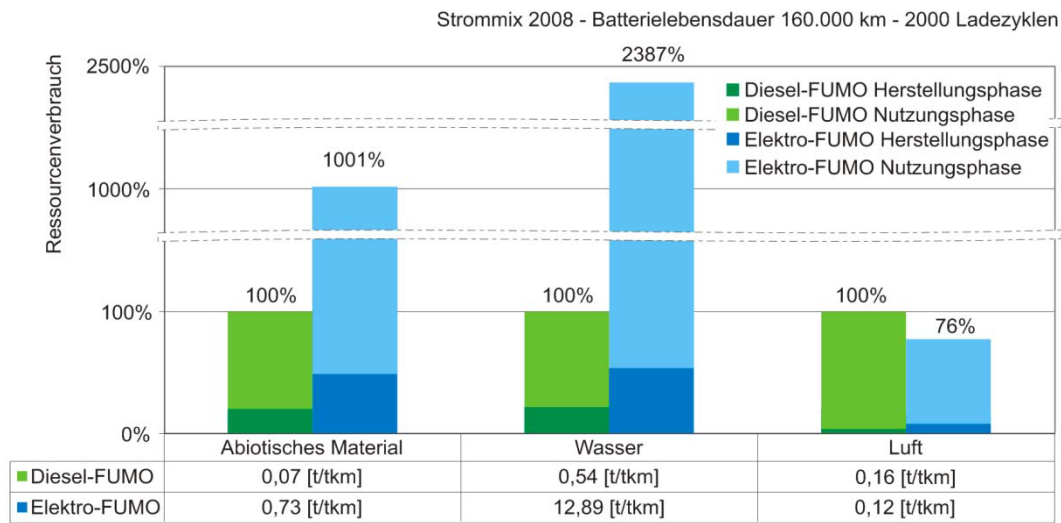
Da bis dato die Infrastruktur für die Energieversorgung von Elektrofahrzeugen wenig ausgebaut ist, müssen diese mit Strom aus dem öffentlichen Netz geladen werden. Diese Energie wird durch verschiedene Kraftwerkstypen entsprechend dem deutschen Strommix bereitgestellt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ermittelt, dass der Ressourcenaufwand zum Betrieb des Elektrofahrzeuges in der Nutzungsphase etwa 90 % des Gesamtaufwandes beträgt. Dementsprechend ist insbesondere der Strommix als ressourcenkritischer Faktor hervorzuheben.

17.3.2 Ressourcenverbrauch des dieselgetriebenen FUMO

Entsprechend der festgelegten Systemgrenzen dienen die in Tab. 49 aufgeführten Komponenten der Ermittlung des lebenswegweiten Ressourcenaufwandes für den dieselgetriebenen *FUMO*. Das Eigengewicht der Bauteile beträgt 400 kg und besteht vorwiegend aus Stahl, Aluminium und verschiedenen Kunststoffen. Analog zum elektrogetriebenen *FUMO* ist auch bei der dieselgetriebenen Variante ein Großteil der benötigten Ressourcen auf den Energie- bzw. Dieserverbrauch in der Nutzungsphase zurückzuführen.

Die Gegenüberstellung der berechneten MIPS-Anteile in Abb. 60 zeigt, dass der Großteil des Ressourcenverbrauches beider Fahrzeugvarianten in der Nutzungsphase stattfindet. Während Elektro- und Dieselantrieb in der Herstellungsphase nahezu gleiche Ressourcenaufwendungen verursachen, wird in der Nutzungsphase eine signifikante Verringerung des Luftverbrauches der Elektrovariante ermittelt. Diese geht jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit drastisch höheren Aufwendungen in den MIPS-Kategorien abiotisches Material und Wasser einher.

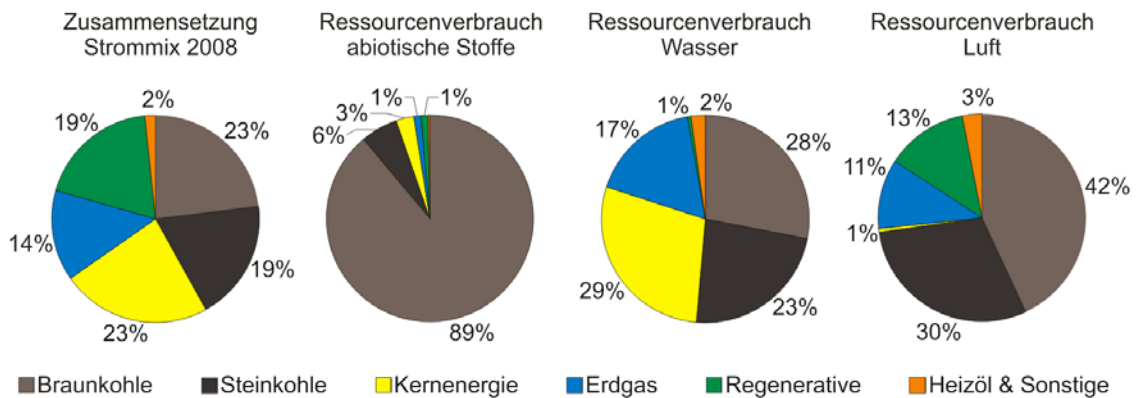
Abb. 60: Lebenswegweite Ressourcenverbräuche der verschiedenen Antriebssysteme



Quelle: Eigene Darstellung

Diese erhöhten Ressourcenbeanspruchungen resultieren im Wesentlichen aus der aktuellen Zusammensetzung des deutschen Strommix' (Abb. 61). So führen etwa die massiven Erdbewegungen insbesondere im Braunkohletagebau dazu, dass nahezu 95 % der abiotischen Ressourcenaufwendungen der Stromerzeugung auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurückzuführen sind.

Abb. 61: Strommix 2008 und die berechneten Ressourcenverbräuche



Quelle: Eigene Darstellung

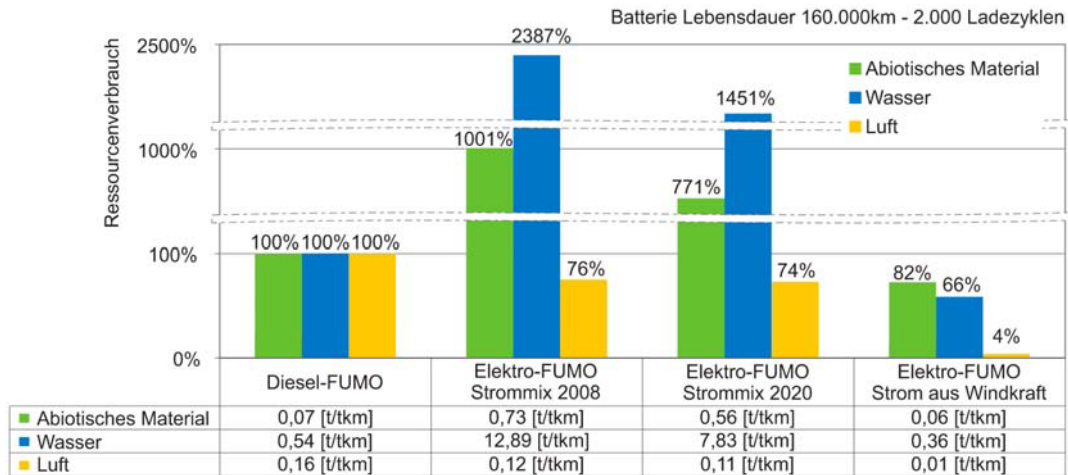
17.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Zur Bestimmung des Ressourceneffizienzpotenzials von elektrogetriebenen Nutzfahrzeugen werden ausgewählte Einflussgrößen auf den Ressourcenverbrauch – Strommix und Batterietechnologie – näher untersucht.

Abb. 62 zeigt, dass bei ausschließlicher Nutzung von Strom aus Windkraft der Ressourcenverbrauch der Elektrovariante das Niveau des Dieselmotors in allen Kategorien unterschreitet. Insbesondere wird dadurch der Luftverbrauch drastisch reduziert, wel-

cher beim Dieselmotor nahezu vollständig auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen ist. Demnach wird mit Hilfe des elektrischen Antriebskonzepts eine starke Verringerung des klimarelevanten CO₂-Ausstoßes ermöglicht.

Abb. 62: Lebenswegweite Ressourcenverbräuche unter Berücksichtigung verschiedener Strommixe

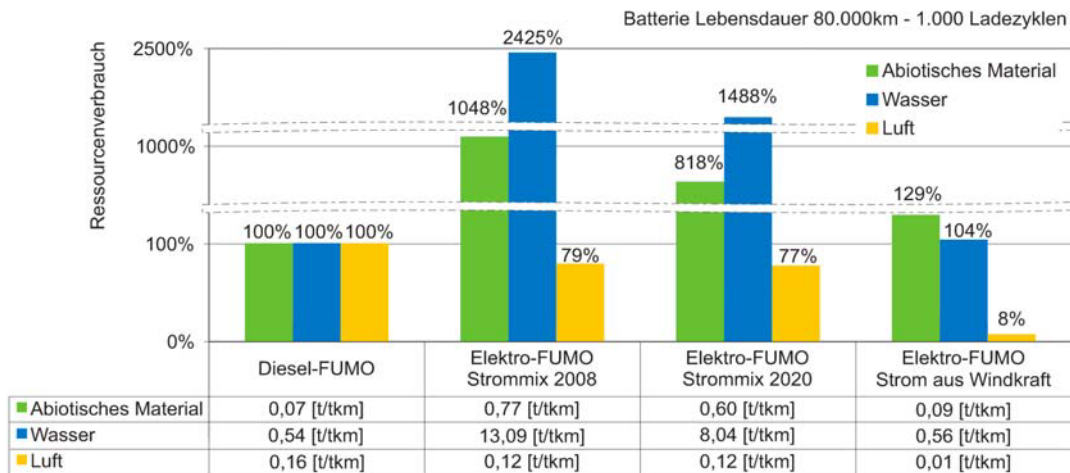


Quelle: Eigene Darstellung

Die Berechnungen auf Basis der prognostizierten Stromerzeugung im Jahr 2020 zeigen zudem, dass auch mit zunehmendem Anteil von regenerativen Energien – innerhalb des Strommix 2020 wird von einem 47 %-Anteil ausgegangen – die Elektrovariante einen deutlich höheren Ressourcenverbrauch in den Kategorien abiotisches Material und Wasser aufweist. Dies ist auf die bereits diskutierten hohen Ressourcenaufwendungen bei der Verstromung von Braun- und Steinkohle zurückzuführen, welche auch 2020 über 30 % der deutschen Stromproduktion ausmacht.

Als weiterer Schwerpunkt des Ressourcenaufwandes gelten die Lithium-Ionen-Akkus der Elektrofahrzeuge. Da über deren Lebensdauer derzeit kaum Informationen verfügbar sind, wird dieser Einfluss durch eine Sensitivitätsanalyse untersucht. Abb. 63 zeigt MIPS normiert auf die Werte des Dieselmotors. Hierbei wird im Gegensatz zu Abb. 62 von einer maximalen Batterielebensdauer von nur 80.000 km (1.000 Ladezyklen) ausgegangen. Dieser Wert stellt eine praxisbezogene Schätzung der möglichen Batterie-ladezyklen dar und basiert nicht auf der vom Hersteller unter Laborbedingungen ermittelten maximalen Lebensdauer. Die kürzere Batterielebensdauer führt jedoch nur zu marginalen Veränderungen der Ressourcenverbräuche, so dass dieser Einflussfaktor gegenüber der Stromerzeugung als gering einzuschätzen ist.

Abb. 63: Lebenswegweite Ressourcenverbräuche unter Berücksichtigung verschiedener Strommixe und einer verkürzten Batterielebensdauer



Quelle: Eigene Darstellung

17.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Durch die MIPS-Berechnungen und die Potenzialanalyse wird deutlich, dass sich durch den Einsatz elektrischer Antriebe in Fahrzeugen der lebenszyklusweite Ressourcenaufwand gegenüber dieselgetriebenen Fahrzeugen unter bestimmten Voraussetzungen deutlich reduzieren lässt. Dazu zählt insbesondere die Nutzung von elektrischer Energie aus rein regenerativen Quellen. Einen weiteren Beitrag können die deutliche Verlängerung der Lebensdauer des Batteriesystems und die Verringerung des Energieverbrauches des Elektrofahrzeuges leisten.

In Ergänzung zu den MIPS-Berechnungen zeigt Tab. 17 einen Überblick über weitere Kriterien, unter denen der zunehmende Einsatz von Elektrofahrzeugen zu bewerten ist.

Tab. 50: Qualitativer Vergleich der Antriebsvarianten

Kriterium	Dieselantrieb	Elektroantrieb
Ressourceneinsatz/ Mengenrelevanz	Derzeitiger Masseneinsatz im Nutzfahrzeug- und Pkw- Bereich mit gut ausgebauter Infrastruktur.	Hohes Anwendungspotenzial in Ballungsräumen und Großstädten.
Ressourceneffizienzpotenzial	Sehr gering, da derzeit schon weit verbreitet. Verbesserungen des Wirkungsgrads bieten nur noch geringe Einsparpotenziale.	Sehr hoch, besonders wenn der Strom zum Laden der Batterie regenerativ (z.B. Windstrom) erzeugt wird.
Sonstige Umweltauswirkungen	Verbrennungsprozess hat Schadstoffausstoß (z.B. Stickoxide, Rußpartikel) zur Folge, der Feinstaub- und Smogbelastung fördert. Die prozessbedingte Emission von Kohlenstoffdioxid verstärkt den globalen Treibhauseffekt.	Während des Betriebs entstehen keine gasförmigen Emissionen, weswegen Verbesserungen der Luftqualität in dicht besiedelten Gebieten zu erwarten sind.

Realisierbarkeit	Diese Antriebsart ist ein bereits weit verbreitetes Konzept mit hohem Marktanteil und ausgereifter Technik sowie gut ausgebauter Infrastruktur.	Wachsendes Umweltbewusstsein, steigende Kraftstoffpreise, knappe fossile Energieträger und gesetzliche Umweltauflagen führen zu verstärkter Akzeptanz in der Gesellschaft. Deutsche Hersteller produzieren bereits Kleinserien (BMW, Daimler), jedoch besteht weiterer Forschungsbedarf zur Verbesserung der Batterietechnik.
Wirtschaftliche Bedeutung	Steigender Dieselanteil im Pkw-Bereich, da durch intensive Entwicklungsarbeit stetige Effizienzsteigerungen erfolgen. Diese werden durch kontinuierlich steigende Treibstoffkosten zumeist wieder egalisiert. Grund dieser Entwicklung ist die verstärkte Nachfrage nach Erdölprodukten sowie deren knapper werdende natürliche Vorkommen.	Für dieses Konzept besteht ein hohes Vertriebspotenzial für den internationalen Massenmarkt, besonders getrieben durch strenge Umweltauflagen infolge hoher Besiedlungsdichte. Hersteller mit innovativen Konzepten zu wirtschaftlichen Preisen steht ein weltweiter Markt offen. Zudem führt die Unabhängigkeit von Ölimporten zu stabileren, vorhersehbaren Kosten.
Kommunizierbarkeit	Gelten im Nutzfahrzeugbereich häufig als Luftverschmutzer.	Großes öffentliches Interesse, da Fahrzeuge in Deutschland weit verbreitet sind. Verstärktes Bewusstsein zum nachhaltigen Wirtschaften, sowie zunehmende Bereitschaft höhere Preise dafür zu zahlen.
Übertragbarkeit	Veraltete Technik aus Industrieländern wird häufig noch in Entwicklungsländer exportiert.	Einsatzgebiet in Ballungsräumen aller Industrie- und Schwellenländer. Konzeptanwendung ist auch für andere Fahrzeugkategorien wie Motorroller oder auch als Hilfsantrieb an Fahrrädern möglich.

Quelle: Reichardt 2010

Die Ergebnisse der Arbeit machen deutlich, dass die Elektrifizierung des Antriebsstranges von Fahrzeugen Potenziale bietet, um lokale Emissionen zu minimieren und die Unabhängigkeit vom Erdöl zu steigern. Allerdings ist das Ressourceneffizienzpotenzial in den MIPS-typischen Kategorien mit den aktuellen Rahmenbedingungen nur bedingt auszuschöpfen. Unter Berücksichtigung einer rein ressourcenorientierten Sichtweise, ist ein Technologiewechsel hin zum Elektromotor demnach derzeit nur bedingt empfehlenswert. Stattdessen muss abgewogen werden, inwiefern bestimmte MIPS-Kategorien bei der Entscheidungsfindung zu gewichten sind, und ob weitere in der Analyse nicht berücksichtigte Faktoren (beispielsweise eine dezentrale Energiespeicherung durch Elektrofahrzeuge) einen verstärkten Einsatz dieser Technologie erfordern.

Die derzeit mit der Entwicklung von Elektrofahrzeugen fokussierte Verringerung des Ausstoßes klimarelevanter Verbrennungsgase kann jedoch in allen diskutierten Szenarien bestätigt werden. Somit sind neben elektromotorisch betriebenen Pkws auch kommunale Nutzfahrzeuge mit derartigen Antrieben in der Lage, einen Beitrag zu den von der Bundesregierung formulierten Klimaschutzzielen zu leisten.

17.6 Quellenverzeichnis

- Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE) (2009): Branchenprognose Stromversorgung 2020, Online verfügbar: <http://www.bee-ev.de/Energieversorgung/Strom/Stromversorgung-2020.php>, zuletzt geprüft: 27.05.2010.
- IPCC Fourth Assessment Report (2007): Climate Change.
- Lettenmeier, M., Rohn, H., Liedtke, C., Schmidt-Bleek, F. (2009): Resource productivity in 7 steps, Wuppertal Spezial 41, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Wuppertal.
- Reichardt, B. (2010): Ressourceneffizienz durch Elektrofahrzeuge, Diplomarbeit, TU-Dresden.
- Ritthoff, M., Rohn, H., Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen, Wuppertal Spezial 27, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal.
- Schweimer, G. W., Levin, M.: Sachbilanz des Golf A4, Online verfügbar: http://www.volkswagen.de/etc/medialib/vwcms/virtualmaster/de/Unternehmen/mobilitaet_und_nachhaltigkeit/downloads/umweltbilanz.Par.0001.File.pdf/sachbilanz_golf_a4_deutsch.pdf, zuletzt geprüft: 26.05.2010, 2004.
- Umweltbundesamt (2010): Etablierung der Nationalen Plattform Elektromobilität; Gemeinsame Erklärung von Bundesregierung und deutscher Industrie; Online verfügbar: <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2010/05/2010-05-03-elektromobilitaet-erklaerung.html>, zuletzt geprüft: 18.06.2010.
- Umweltbundesamt (2009): Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und Fahrzwecke, Online verfügbar: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do;jsessionid=697723F3C21319174A96241847E95663?nodeId=2331>, zuletzt geprüft 16.06.2010.
- Umweltbundesamt (2010): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2008 (Fassung zur EU-Submission 15.01.2010), Online verfügbar: http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/archiv/EM_Entwicklung_in_D_Trendtabelle_THG_v2.1_EU-Submission_2010.xls.zip, zuletzt geprüft 28.05.2010.

18 Ressourceneffizienzkriterien im Produktentwicklungsprozess

W. Hufenbach, R. Kupfer, P. Lucas (Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, ILK)

18.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des prognostizierten Anstiegs der globalen Ressourcenextraktion und im Hinblick auf die bereits zum heutigen Zeitpunkt stark beanspruchten natürlichen Ressourcen, ist eine nachhaltige Verschiebung der Entwicklungsschwerpunkte hin zu ressourceneffizienterem Wirtschaften notwendig. Insbesondere europäische Industrienationen wie Deutschland, welche über geringe eigene Ressourcenvorkommen verfügen, stehen sowohl volks- als auch betriebswirtschaftlich unter dem Druck, vorhandene Ressourcen möglichst effizient zu nutzen.

Ein vielversprechender Ansatz, den Ressourcenverbrauch technischer Produkte bereits frühzeitig zu beeinflussen, ist die entwicklungsbegleitende Analyse und Bewertung unter ressourcenspezifischen Kriterien. Durch eine Erweiterung der konstruktiven Entwicklungsmethodik um ressourcenrelevante Gesichtspunkte sollen Produkte nicht nur technologisch und wirtschaftlich ausgereift, sondern auch ressourceneffizient entwickelt werden können. Der in diesen Prozess eingebundene Personenkreis soll hierbei durch verschiedene zielorientierte Methoden unterstützt werden, um die Qualität des Produktes zu verbessern und dessen lebenszyklusweite Ressourcenverbräuche zu verringern.

18.2 Vorgehensweise

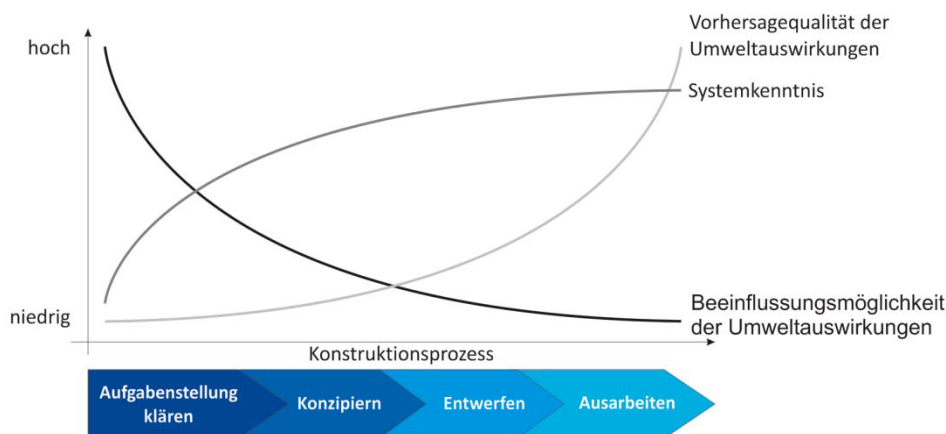
Die Konstruktionslehre und insbesondere das Teilgebiet der Konstruktionsmethodik (KM) dienen der Vermittlung des wissenschaftlichen und technischen Grundwissens zur Konstruktion neuer bzw. weiterentwickelter Produkte.³⁴ Daher bildet die KM einen geeigneten Ausgangspunkt, um ressourcenspezifische Gestaltungskriterien in den Produktentwicklungsprozess zu implementieren. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen des konstruktiven Entwicklungsprozesses (KEP) skizziert und darauf aufbauend Ansatzpunkte und Möglichkeiten beschrieben, den lebenswegweiten Ressourcenverbrauch von Produkten zu beeinflussen.

³⁴ Detaillierte Darstellungen des Vorgehens während des Konstruierens können sowohl der VDI Richtlinie 2221, als auch Pahl/Beitz (2008) entnommen werden. Zu beachten ist, dass das Konstruieren immer ein iterativer Prozess ist, welcher jedoch abstrakt als Ablauf dargestellt wird.

18.2.1 Vorbetrachtungen zum Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozess

Das Potenzial, auf den Ressourcenverbrauch von Produkten einzuwirken, wird sowohl durch die Art der Produktentwicklung als auch durch die vorhandenen Informationsgrundlagen und deren Verwertung bestimmt. Dabei ist die Möglichkeit der Ressourceneffizienzsteigerung bei der Neukonstruktion eines Produktes deutlich höher, als bei einer Anpassungs- oder Variantenkonstruktion. Ebenfalls entscheidend ist die Phase in welcher die Methoden zur Ressourceneffizienzmessung und -steigerung eingesetzt werden. Zu Beginn einer Entwicklung besteht zwar das höchste Potenzial zur Beeinflussung späterer Ressourcenverbräuche bzw. Umweltauswirkungen, jedoch ist sowohl die Systemkenntnis als auch die Kenntnis über das Produkt, dessen Lebensweg³⁵ und Umweltauswirkungen eingeschränkt. Im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses sinken die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz aufgrund der zunehmenden Determination, des Produktes, gleichzeitig steigt jedoch die Vorhersagequalität der zu erwartenden Ressourcenverbräuche. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 64 verdeutlicht. Ein Ziel ressourceneffizienten Designs muss es folglich sein, Informationsdefizite bezüglich der Umweltauswirkungen eines Produktes bereits in der frühen Phase der Entwicklung zu minimieren.

Abb. 64: Vorhersagequalität von Umweltauswirkungen während des Konstruktionsprozess



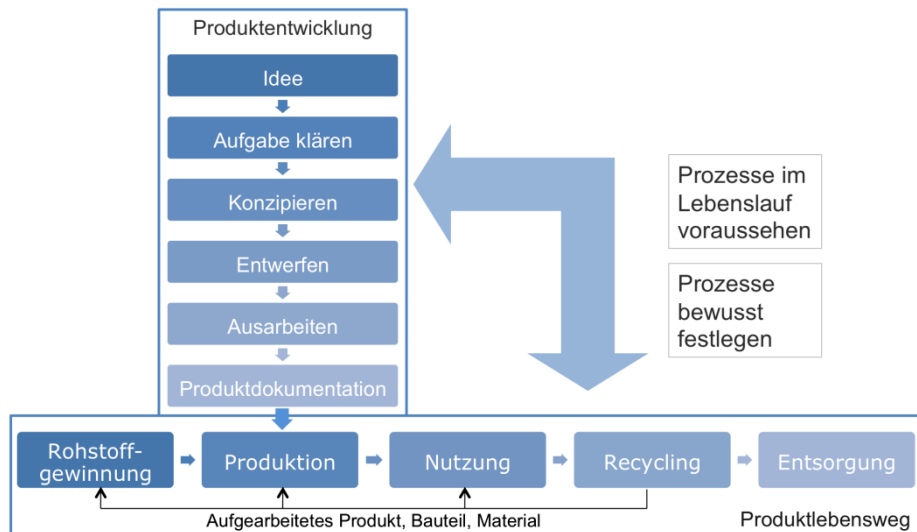
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Atik (2000)

Die Integration des Lebenszyklusgedankens in den konstruktiven Entwicklungsprozess ist entscheidend, um alle Facetten eines Produktlebens und deren Auswirkungen auf den späteren Ressourcenverbrauch zu berücksichtigen. Der an der Entwicklung beteiligte Personenkreis sollte daher die Ressourcenverbräuche der einzelnen Lebenswegphasen bewusst abschätzen und entsprechende Verbesserungspotenziale identifizieren können (Abb. 65). Hierfür stehen eine Reihe von Bilanzierungsverfahren zur Verfügung, welche vornehmlich aus den Umweltwissenschaften stammen. Die Aus-

³⁵ Unter dem Begriff Lebensweg, respektive Lebenszyklus, wird gemäß DIN EN ISO 14040 folgender Ablauf verstanden: Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung, Recycling und Entsorgung.

wahl, Integration und Verifizierung eines geeigneten Verfahrens ist Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen.

Abb. 65: Integrierte Darstellung von Produktentwicklung und Produktlebensweg



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung Grüner (2001)

18.2.2 Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Ermittlung des Ressourcenverbrauchs eines Produktes

Es existieren verschiedene Methoden der lebenszyklusweiten ressourcenorientierten Bewertung von Produkten. Entscheidend ist, dass die Bewertung entwicklungsbegleitend (prospektiv) erfolgt und nicht als nachgelagertes Instrument (retrospektiv) aufgefasst wird. Auftretende Potenziale zur Ressourcenschonung sollen so möglichst frühzeitig identifiziert und genutzt werden. Typische Vertreter solcher ökologischen Bilanzierungsverfahren³⁶ sind:

- Ökobilanz
- Eco-Indikator 95/99
- KEA (Kumulierte Energieaufwand) und
- MIPS (Material Intensität Pro Serviceeinheit)

Insbesondere die von den verschiedenen Verfahren genutzten Prozessbeschreibungen und -darstellungen helfen, ein umfassendes Verständnis der genutzten Ressourcen aufzubauen. Der benötigte Aufwand sowohl für die Datenbeschaffung als auch deren Aufbereitung ist hierbei ein entscheidender Faktor für die Eignung eines Bewertungsverfahrens während der Produktentwicklung. Als zielführend kann daher nur ein Verfahren angesehen werden, welches mit vertretbarem Aufwand valide Ergebnisse bezüglich des Ressourcenverbrauchs ermöglicht.

³⁶ Eine Trennung zwischen ökologischen und ressourcenorientierten Bilanzierungsverfahren erscheint aufgrund der inhaltlichen Nähe nicht notwendig.

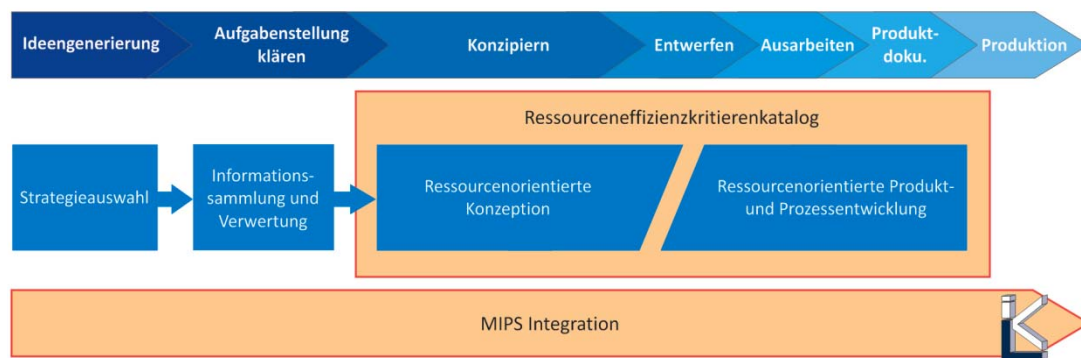
Vergleichende Untersuchungen zu den verschiedenen Verfahren zeigen, dass die MIPS-Methodik³⁷ aufgrund ihrer einfachen Anwendung und der öffentlich zugänglichen Material-Intensitäts-Datenbank³⁸ eine geeignete Ausgangsbasis für die prospektive Ressourceneffizienzbewertung bildet. Im Verhältnis zur Ökobilanz³⁹ wird der Aufwand zur Erfassung von Ressourcenverbräuchen signifikant verringert. Dabei wird jedoch die Richtungsgleichheit der Ergebnisse beibehalten. Kritisch festzuhalten sind die begrenzte Verfügbarkeit von Material-Intensitäts-Werten spezieller Werkstoffe und Fertigungsverfahren sowie die nicht vorhandene Wirkungsabschätzung.⁴⁰

Aufgrund ihrer Vorteile eignet sich daher besonders die MIPS-Methodik zur schnellen und unkomplizierten Ressourcenabschätzung so dass im Folgenden die Integration von MIPS in den Entwicklungsprozess fokussiert wird.

18.2.3 Integration Ressourceneffizienz steigernder Maßnahmen in den Produktentwicklungsprozess

Die Integration der lebenszyklusweiten Betrachtung in den konstruktiven Entwicklungsprozess erfordert eine Erweiterung klassischer Konstruktionssystematiken um neuartige Zielstellungen. Deshalb sind geeignete Kriterien zu erarbeiten, welche den Entwickler dabei unterstützen, die Ressourceneffizienz in jeder Phase der Produktentwicklung zu berücksichtigen und somit die Lösungsgüte zu verbessern. Das über die einzelnen Entwicklungsphasen übergreifende Vorgehen kann Abb. 66 entnommen werden.

Abb. 66: Angestrebte Vorgehensweise der ressourceneffizienten Produktentwicklung



Sowohl während der Bearbeitung der Anforderungsliste als auch bei der Erstellung erster Konzepte und Entwürfe hat die Strategieauswahl maßgeblichen Einfluss auf den

³⁷ Eine geeignete Darstellung der Berechnungsgrundlagen kann Ritthoff et al. (2002) entnommen werden.

³⁸ Bereitstellung durch das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (Lettenmeier 2009)

³⁹ Die Ökobilanz gilt als das renommierteste ökologische Bilanzierungsverfahren, die Berechnungsgrundlagen können der DIN EN ISO 14040 entnommen werden.

⁴⁰ Durch eine nicht vorhandene Wirkungsabschätzung werden bspw. toxische Werkstoffe nicht hinreichend umweltschädlich bewertet. Dies kann im Zweifelsfall zu nicht richtungsgleichen Ergebnissen mit der Ökobilanz führen.

späteren Ressourcenverbrauch. So haben radikale Produktstrategien wie etwa „Nutzen statt Besitzen“ häufig ein deutlich höheres Ressourceneinsparpotenzial als Produktweiterentwicklungsstrategien die bspw. auf die Vereinfachung des Materialrecyclings abzielen. Dies berücksichtigend sollte vor der eigentlichen Konstruktionsarbeit, unter Einbeziehung der *Informationssammlung und -verwertung*, eine Abschätzung der durch eine Strategie zu verfolgenden Maßnahmen und zu erwartenden Wirkungen erfolgen.

Auf dieser Basis können im Folgenden die konkreten Zielstellungen der erweiterten Anforderungsliste abgeleitet werden. Hervorzuheben ist, dass erst diese im eigentlichen Sinn die Arbeit des Konstrukteurs und somit die resultierenden Ressourcenverbräuche bestimmen. Ein Hilfsmittel, um geeignete Zielstellungen zu formulieren, spätere Konzeptbewertungen zu ermöglichen und die nicht triviale Abwägung zwischen technologischen, ökonomischen und ressourcenorientierten Faktoren zu vereinfachen, ist das *Life Cycle Quality Function Deployment (LC-QFD)* (Ernzer). Ergebnis des LC-QFD sind die Gewichtungsfaktoren zur Bewertung späterer Konzepte.

Die ressourcenorientierte Konzeption eines Produktes kann sowohl durch die Nutzung des MIPS-Konzepts als auch durch die Berücksichtigung weiterer Kriterien zur Bewertung der Ressourceneffizienz unterstützt werden. Diese sind im Rahmen der Diplomarbeit in einem Kriterienkatalog zusammengestellt worden, welcher den Konstrukteur bereits in der Phase der Konzeptfindung für ressourcenkritische Faktoren sensibilisieren soll. Eckpunkte wie:

- Langlebigkeit,
- Witterungsbeständigkeit,
- Minimierung der beweglichen Massen sowie
- Geringe Werkstoffvielfalt von Baugruppen

helfen frühzeitig, den Ressourcenverbrauch zu berücksichtigen und steigern somit die Qualität der Konzepte. Idealerweise erfolgt die anschließende Auswahl des zu realisierenden Konzeptes durch eine gewichtete Punktbewertung, wobei die Gewichtungsfaktoren durch das LC-QFD berechnet wurden.

Im Anschluss an die Konzeptauswahl erfolgt das Entwerfen, Ausarbeiten und Dokumentieren der einzelnen Bauteile. Innerhalb dieser Phasen kann es durchaus zu gravierenden Veränderungen oder gar zum Verwerfen des ursprünglichen Konzeptes kommen. Für die Ressourceneffizienz ist dementsprechend entscheidend, dass die Änderungen der Material- und Fertigungsprozessauswahl mittels MIPS überprüft werden.

Weitere Methoden, die indirekt auf die Ressourceneffizienz des Produktes einwirken können, beispielsweise durch robuste und fehlerfreie Fertigungsprozesse, sind die *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)* (Hering) und das *Changemanagement*. Die aufgezeigten Methoden machen deutlich, dass zur Beeinflussung der Ressourceneffizienz eines Produktes vielfältige Möglichkeiten bestehen. In der Praxis ent-

scheidet neben diesen Kriterien jedoch häufig der vorherrschende Kosten- und Zeitdruck über die Anwendung der eingesetzten Methoden.

18.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Die praxisnahe Anwendung der erweiterten Konstruktionsmethodik erfolgt anhand einer am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) entwickelten Schiffsstabilisatorflosse⁴¹ in Leichtbauweise. Konventionell werden diese in Stahlbauweise ausgeführt. Um die Entwicklung der Leichtbauflosse unter Ressourcengesichtspunkten zu begleiten wurden die Prinzipien der erweiterten Konstruktionslehre angewendet. Folglich lag zu Beginn der Fokus auf der ressourceneffizienzorientierte Konzeptbewertung und intensiven *Informationssammlung und -verwertung*. Die Aufbereitung der Erkenntnisse erfolgte mittels *LC-QFD*. Die abgeleiteten Schlussfolgerungen bestimmten maßgeblich die Zielsetzungen der *erweiterten Anforderungsliste* sowie die *gewichtete Punktebewertung* der Konzeptauswahl. Mit Hilfe der Tab. 51 kann gezeigt werden, dass Variante 4, eine Stabilisatorflosse aus glasfaserverstärktem Kunststoff, vergleichbare Eigenschaften bezüglich Belastbarkeit und Herstellungsaufwand aufweist, dabei jedoch einen deutlich geringeren Ressourcenverbrauch als alle anderen Konzepte erfordert. Daher wurde im Folgenden diese Variante entworfen und produziert.

Tab. 51: Konzeptauswahlstabelle der Stabilisatorflosse, inklusive Ressourcenverbrauchsbetrachtung

	Gewichtung	Schalenbauweise	Spantenbauweise	Integralbauweise	
Kriterien/ Variante	Faktor	1	2	3	4
Belastungsfähigkeit	0,20	1,73	1,67	1,53	1,67
Schaft		9	9	8	8
Schale		9	9	8	8
Interface		8	7	7	9
Herstellung	0,05	0,32	0,3	0,35	0,38
...	
...
Ressourcenverbrauch	0,20	0,60	0,60	1,53	1,53
Materialwahl		4	4	8	8
Fertigungsprozesse		3	3	8	8
Umweltschonung		2	2	7	7
Gewicht	0,10	0,3	0,3	0,8	0,9
		3	3	8	9
Gesamtwertung	$\Sigma 1$	6,57	6,48	7,15	7,65

Die Untersuchung bezüglich des gesamt Ressourcenverbrauchs der Stabilisatorflossen zeigt, dass durch den Leichtbau und die Nutzung der erweiterten Konstruktionsmethodik mehr als 80 % an abiotischen Materialien eingespart werden können. Zudem wird der Wasserverbrauch um 20 % gesenkt. Lediglich der Luftverbrauch, welcher vor

⁴¹ Stabilisatorflossen werden eingesetzt um das *Rollen* von Schiffen um die Längsachse zu minimieren.

allem auf den Einsatz von Epoxidharz (EP) als Matrixsystem zurückzuführen ist, wurde gesteigert. Eine Substitution des EP-Harz durch ungesättigtes Polyesterharz ist möglich und würde eine weitere Senkung der Verbräuche in allen MIPS-Kategorien ermöglichen.

18.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Die Anwendung des überarbeiteten Konstruktionsprozesses zeigt, dass die identifizierten Methoden und deren Verknüpfung mit der MIPS-Methodik die Ressourceneffizienz von Produkten deutlich steigern kann. Zudem wurde an dem gewählten Fallbeispiel deutlich, dass insbesondere passive Produkte, also solche, die während der Nutzung kaum Ressourcen verbrauchen, stark von der MIPS gestützten Materialauswahl profitieren. Praxisnahe Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit der Ressourcenverbrauch von aktiven Produkten,⁴² durch die Anwendung der erweiterten Konstruktionsmethodik ähnlich stark gesenkt werden kann.

18.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Die Integration von Ressourceneffizienzkriterien in den konstruktiven Entwicklungsprozess bietet die Möglichkeit, den lebenswegweiten Ressourcenaufwand von Produkten bereits in der Entwicklungsphase zu beeinflussen. Es wurde gezeigt, dass die frühen Phasen der Produktentwicklung – besonders die Konzeptphase – maßgeblich auf den späteren Ressourcenverbrauch einwirken. Durch die Verknüpfung bekannter und neuartiger Bestandteile zu einer ressourceneffizienten Konstruktionsmethodik, ist es gelungen gängige Entwicklungsstandards zu erweitern und eine neue Sichtweise in den Entwicklungsprozess zu integrieren.

Durch die praktische Anwendung der neuen Methodik konnte belegt werden, dass die nach üblichen Gesichtspunkten ausgeführte Produktentwicklung die Bedeutung der Materialauswahl für die Ressourceneffizienz unterschätzt. Durch die Integration des MIPS-Konzepts in den Entwicklungsprozess ist es möglich, erweiterte Handlungsempfehlungen zu geben und somit bspw. durch Materialsubstitution den Ressourcenbedarf von Produkten zu senken. In Ergänzung zu den bereits aufgeführten Argumentationen gibt Tab. 52 einen Überblick über weitere Aspekte des ressourceneffizienten Designs, insbesondere dessen Auswirkungen und Kommunizierbarkeit.

⁴² Aktive Produkte zeichnen da durch aus, dass sie ein Großteil der benötigten Ressourcen während ihrer Nutzungsphase verbrauchen, z.B.: PKWs oder Flugzeuge.

Tab. 52: Qualitative Bewertung des Ressourceneffizienten Designs anhand der 7 Bewertungskriterien nach Rohn et al. (2009)

Kriterium	Ressourceneffizientes Design
Ressourceneinsatz	Diese Arbeit richtet sich insbesondere an das produzierende Gewerbe. Diesem kann gemäß statistischen Bundesamt ca. 25% der Bruttowertschöpfung der BRD zugerechnet werden (2008: 572,72Mrd.€). Durch den übergreifenden Charakter der Methodik können verschiedenste Produktentwicklungen unterstützt werden, wodurch branchenübergreifende Ressourcenverbrauchssenkungen möglich sind. Der konzeptionsbedingte Anwendungsbereich (Maschinenbau) kann durch weitere Anpassungen erweitert werden. Spezialisierungen auf einzelne Bereiche sind sowohl denkbar als auch gewünscht.
Ressourceneffizienzpotenzial	Erwartete Einsparung der Ressourcenverbräuche, insbesondere der abiotischen Faktoren, von ca. 10-20% erscheint durch die Anwendung der erarbeiteten Methodik durchaus realisierbar. In Relation zum Rohstoffbedarf der BRD sind mehrere Millionen Tonnen Einsparungen möglich (genauere Mengenangaben sind eventuell durch weitere Beispielkonstruktionen abschätzbar). Bewertungen bezüglich des Ressourcenverbrauchs an Wasser und Luft sind mittels MIPS Systematik möglich, eine abschließende Interpretation der Auswirkungen allerdings nicht. Daher besteht weiterer Forschungsbedarf um etwaige Rebound-Effekte zu vermeiden.
Sonstige Umweltauswirkungen	Um mögliche sonstige Umweltauswirkungen zu reduzieren empfiehlt die erarbeitete Methodik den Einsatz von Umweltmanagementsystemen. Die zielgerichtete Anwendung dieser trägt maßgeblich dazu bei, den Einsatz umweltgefährdender Stoffe zu vermeiden und Konsequenzen möglicher Umweltwirkungen zu minimieren. Zusätzlich wird die Erarbeitung von Umweltanalysen während der Phase der Aufgabendefinition vorgeschlagen. Insofern besteht ein hohes Potenzial mögliche sonstige Umweltauswirkungen zu antizipieren und entsprechend zu vermeiden.
Realisierbarkeit	Die Realisierbarkeit einzelner Teilaspekte der Methodik ist sehr gut möglich. Für die Bearbeitung des gesamten Spektrums bedarf es allerdings der Zusammenarbeit verschiedenster Experten, welche nicht in jedem Unternehmen verfügbar sind. Zudem sind politische Anreize notwendig um branchenübergreifend eine umweltorientierte Unternehmenskultur zu etablieren. Ebenso bedarf es weiterer Anstrengungen um die MI-Faktoren Datenbanken zu erweitern und somit eine breitere Akzeptanz des MIPS-Konzepts zu fördern.
Wirtschaftliche Bedeutung	Es konnte gezeigt werden, dass durch die Bearbeitung der Methodik durchaus wirtschaftliche Vorteile generiert werden können. Allerdings ist die Fehlerkostenvermeidung schwer quantifizierbar, daher bedarf es einer geeigneten Vermittlung des bekannten Wissens um die Vorteilhaftigkeit herauszustellen. Volkswirtschaftliche Bedeutung erlangen die Kosten für die Beseitigung von ökonomisch induzierten Umweltproblemen. Eine Anrechnung der Kosten zur Wiederherstellung des ökologischen Gleichgewichtes gemäß Verursacherprinzip ist in den seltensten Fällen möglich, folglich verteilen sich die Kosten auf die Gesellschaft (Gemeinlastprinzip). Politische Maßnahmen sind notwendig um eine gerechte Verteilung der anfallenden Kosten zu ermöglichen.
Kommunizierbarkeit	Für ein umfassendes umwelt- und ressourcenorientiertes Verständnis bedarf es des Lösens der Gedanken von gängigen Prinzipien. Schulungen zum Erlangen der benötigten Denkweisen und Fertigkeiten sind möglich und nötig. Für die Kommunikation eines umfassenden gesellschaftlichen Verständnisses bedarf es der Politik. Insbesondere der langfristige Charakter der Entscheidungen muss kommuniziert werden, kurzfristige Erfolgsorientiertheit steht zumeist im Konflikt mit einer nachhaltigen Entwicklung.
Übertragbarkeit	Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Arbeit ist sehr gut vorstellbar. Die Erkenntnisse können in verschiedensten Wirtschaftsbereichen angewendet werden und durch selektive Anpassung weitere Verbesserungen erzielt werden.

Quelle: Eigene Darstellung

Unter dem Blickwinkel der Akzeptanz des ressourceneffizienten Designs bedarf es einer geeigneten Kommunikation der Systematik und einer Ergänzung der vorhandenen MIPS-Datenbanken. Hervorzuheben ist hierbei die Erweiterung der MIT-Werte sowohl für die im Leichtbau gebräuchlichen Werkstoffe (Titan, Magnesium, etc.) als auch für die in der Produktion wesentlichen Prozesse (Drehen, Pressen, Schweißen, etc.).

Wünschenswert ist zudem eine Integration der ‚erweiterten‘ MIPS-Datenbanken in vorhandene CAD Systeme, wodurch eine nahtlose Verknüpfung von technischen und ressourcenorientierten Gesichtspunkten möglich wäre.

Abschließend kann konstatiert werden, dass die erarbeitete Methodik bereits mit dem gegenwärtigen Forschungsstand deutliche Ressourceneinsparpotenziale ermöglicht. Inwieweit die Methode Anklang in der praktischen Umsetzung findet hängt einerseits von der weiteren Entwicklung dieser ab, andererseits von den politischen Gegebenheiten, ressourceneffizientes Design weiter zu fördern.

18.6 Quellenverzeichnis

Atik, A. (2000): Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte, Dissertation, Darmstadt.

DIN Deutsches Institut Für Normung E.V. (2005): 14001, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 13.020.10.

Deutsche Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland: Unsere Strategie für eine Nachhaltige Entwicklung, online verfügbar: http://www.bundesregierung.de/nsc_true/Content/DE/___Anlagen/2006-2007/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung,property=publication File.pdf/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.

Ernzer, M. (2007): Life cycle quality function deployment: An integrated and modular approach: Techn. Univ., Dissertation -Darmstadt, VDI-Verl., Düsseldorf.

Franz, P., Pfahl, S., Jäckel, U., et.al. (2008): Strategie Ressourceneffizienz - Impulse für den ökologischen und ökonomischen Umbau der Industriegesellschaft, online verfügbar: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ressourceneffizienz.pdf>, zuletzt geprüft 28. 01. 2010.

Grüner, C. (2001): Die strategiebasierte Entwicklung umweltgerechter Produkte: Techn. Univ. Darmstadt, Dissertation., VDI-Verl., Düsseldorf.

Hennicke, P., Franz, P. (2006): Ressourceneffizienz – Innovation für Umwelt und Arbeit, Berlin.

Hering, E. (2003): Qualitätsmanagement für Ingenieure: Mit 116 Tabellen, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Lettenmeier, M., Rohn, H., et. al. (2009): Resource Productivity in 7 Steps, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, online verfügbar: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wi beitrag/ws41.pdf, zuletzt geprüft 05/2010.

Netzwerk Ressourceneffizienz (2009): Definitionen, online verfügbar: http://www.netzwerk-ressourceneffizienz.de/de/to_know/kurz_amp_knapp/index.html, zuletzt geprüft 10/2009.

Ritthoff, M. R., Rohn, H., Liedtke, C., et.al. (2002): MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen, <http://maress.iao.fhg.de/authentication/login>.

Rohn, H., Lang-Koetz, C., Pastewski, N., et. Al (2008): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien – Erste Ergebnisse, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, online verfügbar: http://ressourcen.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/RE-Paper_1-1.pdf, zuletzt geprüft 05/2010.

USGS (2010): Mineral Resources Program, online verfügbar: <http://minerals.usgs.gov/>, geprüft 04/2010.

VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: 2221, Berlin, Beuth, 03.100.40, online verfügbar: [http://www.vdi.de/index.php?id=401&type=123&tx_vdirili_pi2\(showUID\)=89894&L=0](http://www.vdi.de/index.php?id=401&type=123&tx_vdirili_pi2(showUID)=89894&L=0), zuletzt geprüft 03/2009, 1993.

19 Ressourceneffizienzpotenziale durch Umsetzung des Leichtbaus unter Nutzung neuartiger Werkstoffe

W. Hufenbach, R. Kupfer, P. Lucas, S. Rothenberg (Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau- und Kunststofftechnik (ILK))

19.1 Einleitung

Zukunftsfähige Produkte zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit begrenzten Ressourcen sparsam umgehen. Der Leichtbau übernimmt hier eine Vorreiterrolle, denn die Symbiose von leichtbauinhärenter Materialeffizienz einerseits und Ressourcenschonung während des gesamten Lebenszyklus andererseits bietet das Potenzial einer nachhaltigen ökonomischen Entwicklung. Insbesondere in der Mobilitätsindustrie als technologischer Schlüsselbranche werden derartige Fragestellungen derzeit stark fokussiert. Zukünftige Fahrzeugentwicklungen sollen so neben den klassischen Anforderungen an Sicherheit, Komfort und Qualität auch ressourcenrelevante Gesichtspunkte wie ein möglichst geringes Fahrzeuggewicht für verringerten Verbrauch und niedrige Abgas- und Geräuschemissionen bei unverändert hoher Transportleistung berücksichtigen.

Die hohen mechanischen Eigenschaften sowie die wirtschaftliche Fertigung mit hoher Reproduzierbarkeit, die Serientauglichkeit und die Recyclingfähigkeit machen die noch junge Werkstoffgruppe der Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT)-Verbunde für solche Leichtbauanwendungen besonders interessant.

Innerhalb des Transferbereiches zum DFG Sonderforschungsbereich (SFB) 639 wurde am *Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)* der Technischen Universität Dresden eine neuartige Prozesskette zur Herstellung von Leichtbausitzschalen aus textilverstärkten Thermoplasten konzipiert und umgesetzt. Es wurde gezeigt, dass der durchgängige Entwicklungsprozess von der Werkstoffcharakterisierung über die Konstruktion bis hin zur Prozessentwicklung neben einer deutlichen Gewichtsreduzierung die Etablierung eines wirtschaftlichen Fertigungsprozesses für derartige Bauteile im Serienbetrieb ermöglicht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für diese Prozesskette untersucht, inwiefern durch den Einsatz moderner Leichtbauwerkstoffe, angepasster Konstruktionsprinzipien und Fertigungstechnologien neben der geringeren Bauteilmasse auch eine Verminderung des lebenszyklusweiten Ressourcenaufwandes ermöglicht wird.

19.2 Vorgehensweise

Zur Ermittlung des Ressourceneffizienzpotenzials werden die Lebenswege von Stahl- und Leichtbausitzschale abgebildet sowie der Materialaufwand mit Hilfe der MIPS-Methodik analysiert. Anhand der Ergebnisse erfolgt ein Vergleich der Werkstoffe und

Fertigungstechnologien, welcher die Übertragung der Resultate auf andere Produkte ermöglichen soll.

19.2.1 Vorstellung der betrachteten Bauteile

Bei dem entwickelten Bauteil handelt es sich um die als Sitzschale bezeichnete Tragstruktur der Rückbank eines *VW Golf plus*. Diese Rückbank ist asymmetrisch teilbar, daher gibt es eine kleine und eine große Bauteilvariante. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch das größere Bauteil betrachtet (Abb. 67).

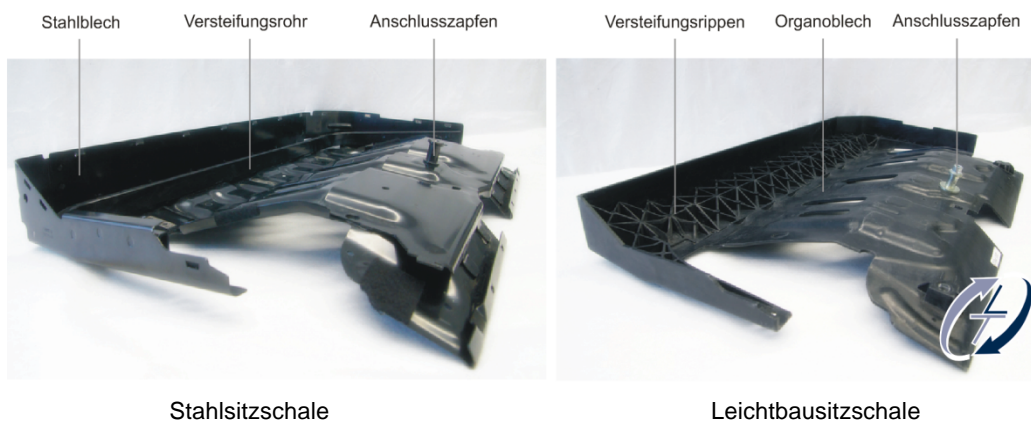
Abb. 67: Sitzschale, Anwendungsbereich



Quelle: Tutorials 3D, eigene Darstellung

Die konventionelle Sitzschale besteht aus Stahl und ist in Differentialbauweise aus einem Rohr und vier Blechen gefertigt (Abb. 68). Ihr Gewicht beträgt 4,6 kg.

Abb. 68: Gegenüberstellung der Sitzschalenvarianten



Bei der neu entwickelten Leichtbausitzschale handelt es sich um eine Konstruktion aus glasfaserverstärktem Polypropylen (Abb. 68). Die flächigen Bereiche des Bauteils weisen eine Textilverstärkung auf, in hoch belasteten Zonen befindet sich zusätzlich eine versteifende Rippenstruktur aus einer Langfaser-Thermoplast-Pressmasse (LFT). Durch die neuartige Werkstoffauswahl und Konstruktion konnte die Bauteilmasse auf 2,4 kg reduziert werden.

19.2.2 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Die Rahmenbedingungen und Systemgrenzen sind wesentliche Einflussgrößen bei der Abbildung der Prozessketten und Szenarien. Analog MIPS wurden in den durchgeführten Analysen die in den Bauteilen enthaltenen Materialien sowie der bei ihrer Herstellung anfallende Verschnitt betrachtet. Da sich der Fertigungsprozess der Leichtbausitzschale substantiell von der Stahlvariante unterscheidet, wird auch die für die Bauteilfertigung notwendige Energie berücksichtigt. Nicht betrachtet werden dagegen die bei der Herstellung eingesetzten Maschinen, Werkstoffe und Betriebsstoffe sowie inter- und innerbetriebliche Transportprozesse. Des Weiteren wird eine ausschussfreie Produktion angenommen. Zusätzliche Lasteinleitungselemente an der Leichtbausitzschale bestehen aus Stahl. Da diese Bauelemente jedoch bei der Stahl- und der Leichtbauvariante nahezu identisch sind, werden sie in der MIPS-Analyse nicht berücksichtigt.

In der Nutzungsphase ist die Sitzschale im Auto verbaut und trägt über ihre Masse zum Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges bei. Dabei wird den Bauteilen entsprechend ihrer Masse ein Anteil am Gesamtverbrauch des Fahrzeuges angerechnet. Diese Annahme ist relevant, wenn unterschiedlich schwere Bauteile (Serviceeinheit Sitzschale) oder Gewichtseinsparpotenziale bei der Serviceeinheit Leichtbaukilogramm durchgeführt werden. Grundlage für die Berechnungen sind die ermittelten Verbrauchsreduktionen von Koffler und Rohde-Brandenburger, wonach eine durchschnittliche Senkung des Verbrauchs von 0,12 l Diesel pro 100 km und 100 kg im *New European Driving Cycle (NEDC)* erreichbar ist (Koffler, 2010).

19.2.3 Definition der Service-Einheit

Die Serviceeinheiten bilden die Basis für die Bewertung des Ressourcenaufwandes und den Vergleich der gewählten Szenarios. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Serviceeinheiten verwendet:

- eine Sitzschale (SI)
- ein Leichtbaukilogramm (Lkg)

Die Serviceeinheit Sitzschale berücksichtigt die Herstellung, Nutzung und Verwertung einer Sitzschale in einem Kraftfahrzeug über eine Distanz von 150.000 km (analog Schweimer (2000)). Auf Basis dieser Einheit können die beiden Bauteilvarianten direkt miteinander verglichen werden.

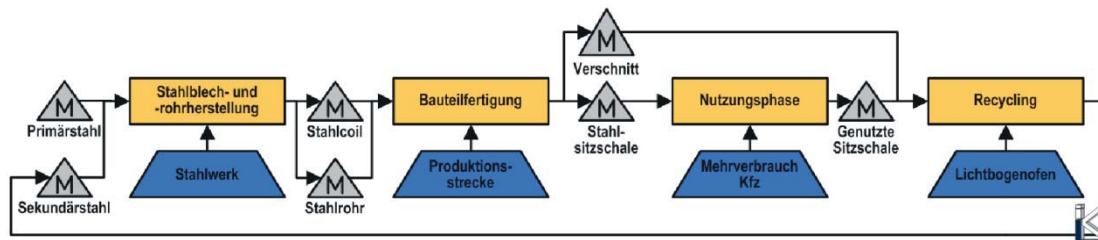
Die Serviceeinheit Leichtbaukilogramm beinhaltet die Herstellung eines Bauteiles mit einer Masse von 1 kg in der entsprechenden Technologie. Mit dieser Einheit können die Werkstoffe und Technologien verglichen und eine Grundlage für die Abschätzung von Ressourceneffizienzpotenzialen ähnlicher Anwendungen geschaffen werden.

19.2.4 Abbildung der Szenarien

Im Rahmen des SFB 639 wird ein datenbankgestütztes Modellierungs- und Simulationswerkzeug für die Prozesskettenanalyse entwickelt und angewendet. Das Werkzeug

unterstützt die Beschreibung und Analyse der im jeweiligen Prozessschritt am Werkstück auftretenden Zustandsänderungen unter Berücksichtigung der prozessspezifischen, die Bauteileigenschaften beeinflussenden technisch-technologischen Wechselwirkungen. Eine auf dieser Basis durchgeführte Prozesskettenanalyse bildet die Grundlage für die MIPS-Berechnungen dieser Untersuchungen (Abb. 69). Diese Prozessketten stellen sowohl den Gesamtprozess als auch einen detaillierten Teilprozess der Stahlsitzschalenherstellung dar.

Abb. 69: Stoffstromanalyse der konventionellen Stahlsitzschale

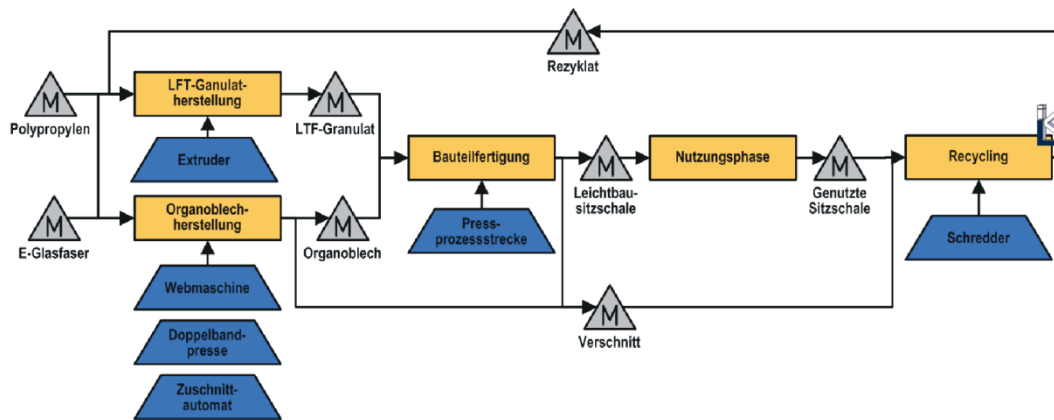


Quelle: Eigene Darstellung

Für die Berechnung des Ressourcenverbrauchs der konventionellen Sitzschale und der Leichtbausitzschale wurde der Strommix für das Jahr 2008 neu berechnet. Zudem werden für die Stahlsitzschale handelsübliche Sekundärstahlanteile von 45 % (Stahl Zentrum 2009) in Betracht gezogen und es wird eine Verschchnittquote von 30 % während der Herstellung zugrunde gelegt. Dieser Anteil wird vollständig als Sekundärstahl wieder in die Produktion eingebracht. Die eingesetzten Materialien sind Warmbandstahl (Primärstahl), Stahl der Lichtbogenroute (Sekundärstahl), Erdgas und Diesel.

Abb. 70 zeigt die Prozesskette zur Fertigung der Leichtbausitzschale. Bei der Herstellung des textilverstärkten Organoblechs wird ein Verschchnitt von 25 % berücksichtigt, welcher rezykliert und dem LFT beigemischt werden kann. Für den dargestellten Prozess werden ein praxisnaher Rezyklatanteil von 30 % Diebold (2010) und das gleichzeitige Ausformen von zwei Bauteilen in der Presse angenommen. Generell werden zur Herstellung der Leichtbausitzschale nur die Materialien Glasfaser und Polypropylen berücksichtigt. Während der Nutzungsphase kann zudem ein Teil des Dieserverbrauchs dem Bauteil angerechnet werden.

Abb. 70: Stoffstromanalyse der Leichtbausitzschale



Quelle: Eigene Darstellung

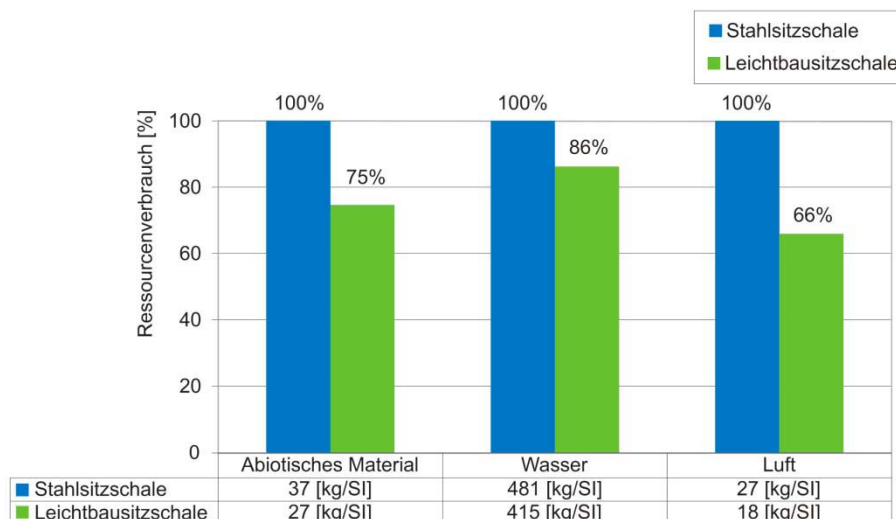
19.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Der Ressourcenverbrauch der beiden Szenarien wurde auf Grundlage der ermittelten Materialien und Energien nach dem MIPS-Konzept berechnet. Die Kategorien biotische Stoffe und Bodenbewegung werden nicht betrachtet, da für diese keine Materialinput-Faktoren vorliegen.

19.3.1 Ressourcenverbrauch pro Sitzschale

Werden die Stoffstromanalysen bezüglich der Serviceeinheit Sitzschale ausgewertet, kann gezeigt werden, dass der Ressourcenverbrauch in allen MIPS-Kategorien durch Einsatz textilverstärkter Thermoplastwerkstoffe deutlich verringert wird (Abb. 71).

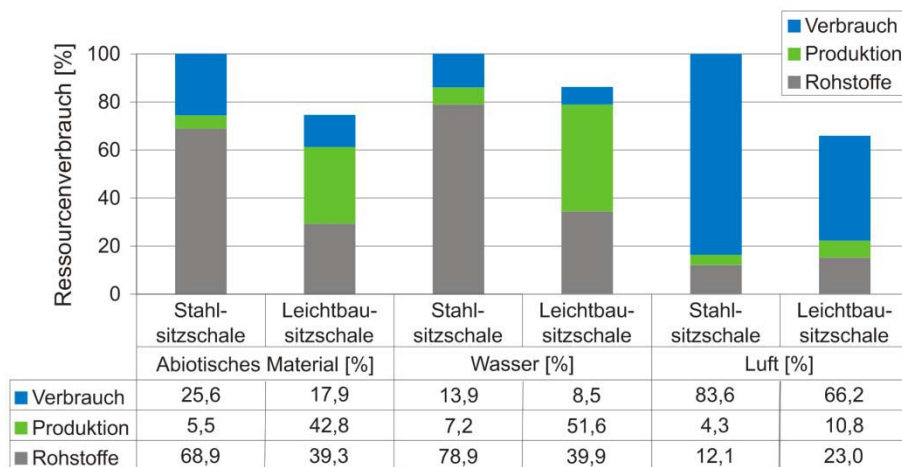
Abb. 71: Materialinput pro Sitzschale



Quelle: Eigene Darstellung

Die Zusammensetzung der Materialintensitäten in den verschiedenen Kategorien kann Abb. 72 entnommen werden. Hierdurch ist es möglich, Rückschlüsse auf die ressourcenintensiven Lebenszyklusphasen zu ziehen. Während bei der Stahlsitzschale die Rohstoffe den größten Einfluss auf den Ressourcenaufwand haben, dominiert bei der Leichtbausitzschale die im Produktionsprozess verbrauchte Energie. Vor allem innerhalb der MIPS-Kategorie Luft ist der Einfluss des Dieserverbrauches während der Nutzungsphase maßgeblich, da durch das höhere Gewicht der konventionellen Sitzschale der Luftverbrauch, also die im Verbrennungsprozess umgesetzte Luft, gegenüber der Leichtbausitzschale deutlich ansteigt.

Abb. 72: Verteilung des Materialeinsatzes pro Sitzschale

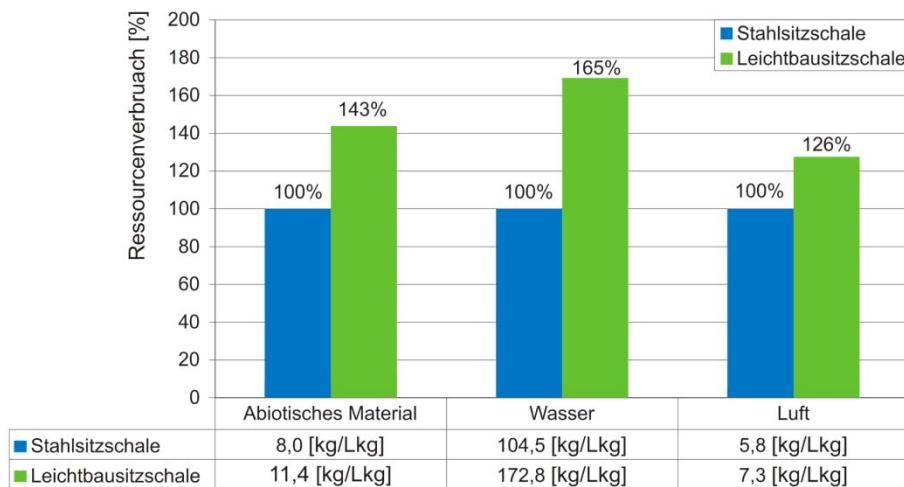


Quelle: Eigene Darstellung

19.3.2 Ressourcenverbrauch pro Leichtbaukilogramm

Die Gegenüberstellung der Bauteilvarianten in der Serviceeinheit Leichtbaukilogramm zeigt, dass die Leichtbausitzschale pro Masseinheit deutlich mehr Ressourcen verbraucht als die Stahlsitzschale, vgl. Abb. 73. Der Materialeinsatz pro Kilogramm einer Sitzschale aus glasfaserverstärktem Polypropylen liegt in allen drei Kategorien auf einem deutlich höheren Niveau. Dies impliziert, dass nur über eine entsprechende Gewichtsreduzierung der Ressourcenverbrauch das Niveau der Stahlvariante erreicht. Der Einfluss des Kraftstoffverbrauchs spielt in dieser Berechnung keine Rolle, da der Ressourcenverbrauch sich auf die Service-Einheit Leichtbaukilogramm bezieht und damit die Masse in beiden Fällen gleich ist.

Abb. 73: Materialinput pro Leichtbaukilogramm

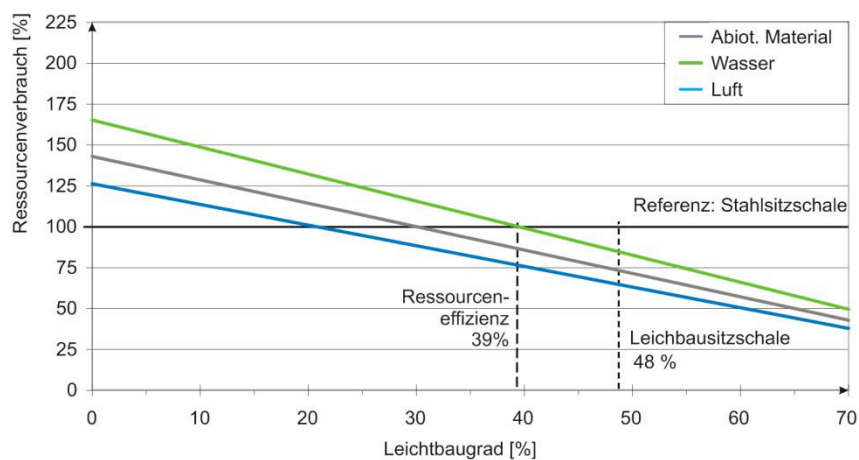


Quelle: Eigene Darstellung

19.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Im Folgenden wird die Sensitivität des Ressourcenverbrauches auf die realisierte Gewichtseinsparung analysiert. Abb. 74 zeigt die Veränderung der MIPS-Werte über dem Leichtbaugrad, welcher in diesem Fall die prozentuale Masseinsparung des Faser-verbundbauteils im Vergleich zur Stahlsitzschale angibt. Die MIPS-Trendlinien nähern sich mit zunehmender Gewichtseinsparung des Leichtbauteils dem Referenzbauteil an. Während bereits ab einer Gewichtseinsparung von etwa 20 % innerhalb der Kategorie Luft der Ressourcenverbrauch äquivalent ist, bedarf es zur Senkung des Ressourcenverbrauches in allen MIPS-Kategorien einer Massereduktion um 39 %. Die aktuell entwickelte Leichtbaulösung ermöglicht eine Massereduktion um 48 % und ist damit in allen Kategorien deutlich ressourcenextensiver als die Stahlvariante.

Abb. 74: Einfluss der Gewichtseinsparung durch Leichtbau



Quelle: Eigene Darstellung

Ein Vergleich des Ressourceneinsparpotenzials bei einer veranschlagten Produktionsmenge von 80.000 Sitzschalen pro Jahr zeigt Tab. 53.

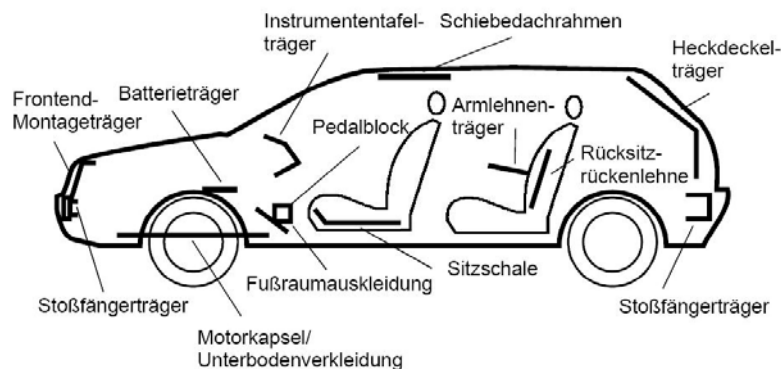
Tab. 53: Ressourcenverbrauch und Einsparung der untersuchten Szenarien

Absolute Einsparpotenziale			
Szenario	abiotisches Material	Wasser	Luft
Stahlsitzschale	2.932 t	38.460 t	2.125 t
Leichtbausitzschale	2.188 t	33.169 t	1.401 t
Differenz	- 744 t (- 25 %)	- 5.291 t (- 14 %)	- 725 t (- 34 %)

Quelle: Eigene Berechnung

Textilverstärkte Thermoplaste eröffnen aufgrund ihres spezifischen Eigenschaftsspektrums ein erweitertes Anwendungsgebiet für Leichtbauanwendungen in der Automobilindustrie. Neben den Vorder- und Rücksitzschalen sind Rückenlehnen, Reserveradmulde und Türinnenverkleidungen fokussierte Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie. Weitere mögliche Anwendungen für textilverstärkte Thermoplastwerkstoffe sind in Abb. 75 dargestellt.

Abb. 75: Mögliche Anwendungen für textilverstärkte Thermoplastbauteile im Kraftfahrzeug



Quelle: Brast 2001

19.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

In den dargestellten Untersuchungen konnte demonstriert werden, dass die noch junge Werkstoffgruppe der textilverstärkten Thermoplaste ein erhebliches Potenzial für die Entwicklung ressourceneffizienter Leichtbauinnovationen besitzt. Es wurde gezeigt, dass das Konzept einer Leichtbausitzschale in Textil-LFT-Technologie einen deutlich geringeren Ressourcenverbrauch als die funktionsgleiche Stahlsitzschale aufweist. Während bei der Leichtbausitzschale die Produktionsenergie einen entscheidenden Einfluss auf den Ressourcenverbrauch hat, wurde festgestellt, dass bei der Stahlsitzschale insbesondere die höhere Bauteilmasse die Ressourceneffizienz beeinträchtigt.

Moderne Leichtbaustrukturen aus textilverstärkten Thermoplasten ermöglichen durch die Verringerung der Bauteilmasse eine signifikante Steigerung der Ressourceneffizienz. Neben Sitzschalenbauteilen können etliche andere Strukturen im Interieur und

Exterieur von Kraftfahrzeugen, z.B. Unterbodenverkleidungen, in analoger Technologie ausgeführt werden. Durch den verstärkten Serieneinsatz neuartiger Leichtbautechnologien lassen sich so in einem der wichtigsten deutschen Industriezweige deutliche Ressourceneinsparungen erreichen. Dabei ist die ressourcenspezifische Analyse einer konstruktiven Lösung im Systemverbund bereits in der Konstruktions- und Entwicklungsphase von großer Bedeutung.

Ergänzend zu den MIPS-Berechnungen zeigt weitere Aspekte eines zunehmenden Einsatzes textilverstärkter Thermoplastwerkstoffe.

Tab. 54: Qualitative Bewertung der Leichtbausitzschale

Kriterium	Leichtbausitzschale
Ressourceneinsatz	Die Sitzschale wird in ca. 80.000 Golf plus pro Jahr verwendet werden, da sie nur bei Autos mit verschiebbarer Rücksitzbank benötigt wird. Alle verwendeten Materialien sind seit Jahren in Verwendung und werden großindustriell hergestellt. Damit ist kein Rebound-Effekt zu erwarten.
Ressourceneffizienzpotenzial	Ein hohes Ressourceneffizienzpotenzial der Technologie, besonders in der Kategorie Luft, ist nachgewiesen worden.
Sonstige Umweltauswirkungen	Durch die Verwendung der bewährten Materialien Glas und Polypropylen, welche seit vielen Jahren großindustriell gefertigt und verarbeitet werden, sind keine sonstigen Umweltauswirkungen zu erwarten.
Realisierbarkeit	Während die Verwendung von Organoblechen zu den neueren Entwicklungen zählt, ist das LFT-Pressverfahren bei vielen Automobilherstellern bzw. deren Zulieferern häufig eingesetzt und Stand der Technik. So werden beispielsweise Frontendmontageträger (Daimler, BMW, VW), Unterbodenverkleidungen (BMW, PSA) und Kofferrauminnenverkleidungen (Smart) mit dieser Technologie hergestellt.
Wirtschaftliche Bedeutung	Leichtbau und Multi-Material-Design haben in der Schlüsselindustrie des Automobilbaus eine große Bedeutung. Von allen deutschen OEMs werden derzeit derartige Entwicklungen betrieben. Dies erfolgt in enger Verzahnung mit den Zulieferern und dem Maschinen- und Anlagenbau. Aufgrund der besonderen Stellung des Automobil- und Maschinenbaus in Deutschland besitzt die innovative Technologie der Leichtbausitzschale ein hohes Marktpotenzial und ist damit ein relevantes Exportgut. Demnach hat die Technologie eine hohe wirtschaftliche Bedeutung.
Kommunizierbarkeit	Durch die offensive Kommunikation von Leichtbau durch deutsche Automobilhersteller in verschiedenen Kampagnen wird dieses Thema von der Öffentlichkeit als innovativ angesehen. Zudem werden faserverstärkte Kunststoffe häufig mit dem Thema Motorsport assoziiert und sind damit als Zukunftstechnologie positiv besetzt.
Übertragbarkeit	Der Einsatz textilverstärkter Thermoplastwerkstoffe liegt derzeit schwerpunktmäßig im Automobilbau. Die Übertragung auf eine Vielzahl weiterer Bauteile im Pkw ist möglich. Zudem sind Anwendungen bei Nutzfahrzeugen sowie bei zukünftigen Elektrofahrzeugen möglich. Weitere Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Sportgeräteindustrie sind im Serienbetrieb. Derzeit werden zunehmend Anwendungen in der Luftfahrt fokussiert.

19.6 Quellenverzeichnis

- Brast, K. (2001): Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier- / Pressverfahren. Diss. RWTH Aachen.
- Diebold, K. (2010): Vom Produktabfall zum „Abfall“-Produkt, in: Industrieanzeiger, Ausgabe02/2010.
- Koffler, C., Rohde-Brandenburger, K.: On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments. Z. International Journal of Life Cycle Assessments. 2010, Nr. 1, S. 128-135.

Rothenberg, S. (2010): Ressourceneffizienz durch Leichtbau. Interner Bericht. TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik.

Schemme, M.: LFT – development status and perspectives. Z. Reinforced plastics. 2008, Nr. 1, S. 32-39.

Schweimer, G., Levin, M. (2000): Sachbilanz des Golf A4. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Stahl Zentrum (2009): Engagement für Stahl 2009. Düsseldorf: Stahl Zentrum.

Tutorials 3D: Blueprint VW Golf plus. www.tutorials3d.com/eng/blu_sheet.asp?id=149.

20 Ressourceneffizienzpotenziale höher- und höchstfester Stähle

Masih Sadeghi

TU Darmstadt/ Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen)

Benjamin Kuhrke

TU Darmstadt/ Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen

20.1 Einleitung

Höher- und höchstfeste Stähle (HHS) zeichnen sich durch eine besonders hohe Streckgrenze und Zugfestigkeit aus und können damit im Vergleich zu konventionellem Stahl bei geringerem Materialeinsatz den gleichen Ansprüchen nach Funktion und Sicherheit gerecht werden. HHS werden z.B. in der Automobilindustrie zur Herstellung von Tailored Blanks (TB) eingesetzt. TB werden aus Platinen verschiedener Werkstoffgüten oder Blechdicken zusammengesetzt. Dies ermöglicht, verschiedene Stellen des Bauteils an lokale Belastungen anzupassen und Material einzusparen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, welche Ressourceneinsparpotenziale sich bei der Stahlherstellung durch innovative Technologien ergeben, welchen Einfluss der höhere Anteil an Legierungselementen auf den Ressourcenverbrauch unterschiedlicher Stahlsorten hat und wie sich dies insgesamt auf den Ressourcenverbrauch von Kraftfahrzeugen auswirkt.

20.2 Vorgehensweise

Zunächst wurden die Prozessketten zur Erzeugung von konventionellen und höher- und höchstfesten Stahlprodukten auf Ansatzpunkte zur Ressourceneinsparung untersucht. Als wesentliche Untersuchungsgegenstände wurden die Verfahren zur Herstellung von Warmbänderzeugnissen und die Auswirkungen des Einsatzes von HHS auf den Ressourcenverbrauch in der PKW-Anwendung identifiziert.

20.2.1 Untersuchungsgegenstände

Untersucht wurden zum einen die Herstellungsverfahren für Stahlbleche (siehe rechte Spalte in Tab. 55). Darüber hinaus wurde der Ressourcenverbrauch konventioneller Stähle und von HHS in Kombination mit den verschiedenen Herstellungsverfahren in ihrer Anwendung im PKW untersucht (Tab. 55). Berücksichtigt wurden dabei die Roh-eisen- und Legierungselementbereitstellung, die Weiterverarbeitungsverfahren zu Blechen, die Schweißarbeiten zur Herstellung der Fahrzeugkarosserie sowie der Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase des Fahrzeugs.

Tab. 55: Untersuchte Werkstoffe und Verfahren zur Warmbänderzeugung

Szenario	Werkstoff	Verfahren zur Warmbänderzeugung
1	Konventioneller Stahl Baustahl S235J2	Konventioneller Strangguss
2	Tailored Blanks aus HHS	Konventioneller Strangguss
3	Tailored Blanks aus HHS	CSP-Verfahren (<i>Compact Strip Production</i>)
4	Tailored Blanks aus HHS	DSC-Verfahren (Direct Strip Casting)
5	Tailored Blanks aus HHS	Twin-roll Strip Casting

20.2.2 Definition der Service-Einheit

Zum Vergleich der verschiedenen Herstellungsverfahren von Warmbänderzeugnissen wurde als Serviceeinheit Tonne Ressourcenverbrauch pro Tonne Werkstoff gewählt (t/t). Zum Vergleich von HHS in der PKW-Anwendung wurde als Serviceeinheit Tonne Ressourcenverbrauch pro Lebenszyklus des Fahrzeugs gewählt.

20.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Nach Angaben von Thyssen Krupp sind die Umformprozesse zur Herstellung der Endabmessungen der Erzeugnisse (z.B. Pressen von Karosserieteilen) bei konventionellen Stahlerzeugnissen und z.B. Tailored Blanks gleich und wurden aus diesem Grund vernachlässigt.
- Die Roheisenbereitstellung erfolgt bei allen untersuchten Stahlsorten auf der Hochofenroute. Daher wurde der Ressourceneinsatz des Roheisens für alle Stahlsorten mit den gleichen Werten angesetzt.
- Für die verschiedenen Stahlsorten wurde der Ressourcenbedarf für die Gewichtsanteile der speziellen Legierungselemente für HHS bestimmt. Der restliche Gewichtsanteil wurde mit Roheisen bilanziert.
- Die jährliche Fahrleistung des PKW wurde in Anlehnung an eine Studie zu CO₂-Einsparpotenzialen durch Stahlprodukte in Fahrzeugen mit 13.000 km p.a. bei einem Fahrzeugleben von 8 Jahren festgelegt (Boston 2009).
- Das Verschweißen der Bleche wurde bei der Analyse berücksichtigt.
- Von den 17 im Fahrzeug verbauten HHS konnten für drei Sorten keine Legierungszusammensetzung gefunden werden. Aufgrund des relativ geringen Einflusses der Legierungselemente auf den Ressourceneinsatz der Werkstoffe wurden diese mit 100% Roheisen angesetzt.
- Für jegliche Eisenmetalle wurde angenommen, dass sie aus Primärrohstoffen im Hochofen hergestellt werden.
- Recycling und Wiederaufbereitungsprozesse wurden nicht berücksichtigt.
- Produktionsabfälle wurden nicht berücksichtigt.

- Transporte wurden nicht berücksichtigt.

20.2.4 Datenerfassung

Für die Bestimmung des Ressourcenverbrauchs für die Hochofenroute von Roheisen konnte eine Studie des Wuppertal Institut genutzt werden (Ritthoff et al. 2002). Zur Bestimmung der Gewichtsanteile von HHS im PKW und der notwendigen Daten zur Gesamtschweißnahtlänge wurde auf die Ergebnisse des Projektes Ultra Light Steel Auto Body zurückgegriffen (Automotive 2002). Für die Bestimmung der Zusammensetzung der Stahlsorten wurden Datenblätter verschiedener Hersteller verwendet. Zum Vergleich der verschiedenen Herstellungsverfahren von Blecherzeugnissen wurden Angaben des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute (Lüngen 2005) herangezogen. Angaben zum spezifischen Energieverbrauch beim Schweißen wurden einer Veröffentlichung der ESAB Welding Equipment AB aus Schweden entnommen (Wemann 1999).

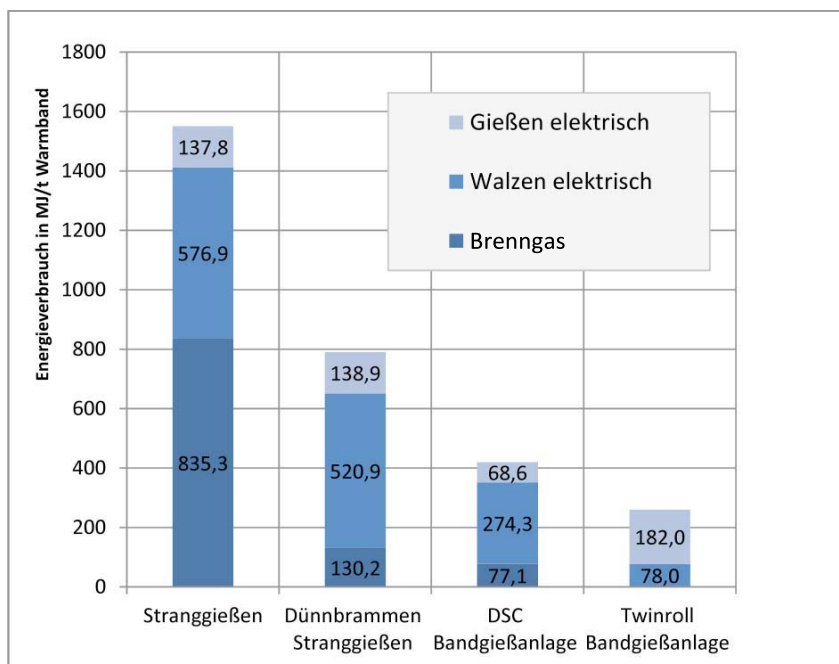
20.3 Ergebnisse der Materialintensitäts- und Potenzialanalyse

Aus den in der Sachbilanz ermittelten Daten zu Materialzusammensetzungen, Energieverbrauch und Kraftstoffverbrauch wurde unter Einbezug der vorgelagerten Stoffströme der gesamte Ressourcenverbrauch nach dem MIPS-Konzept für die genannten Untersuchungsgegenstände ermittelt.

20.3.1 Ressourcenverbrauch verschiedener Verfahren zur Warmbänderzeugung

In Abb. 76 ist der Energieverbrauch in MJ/t Warmband für die verschiedenen Verfahren angegeben.

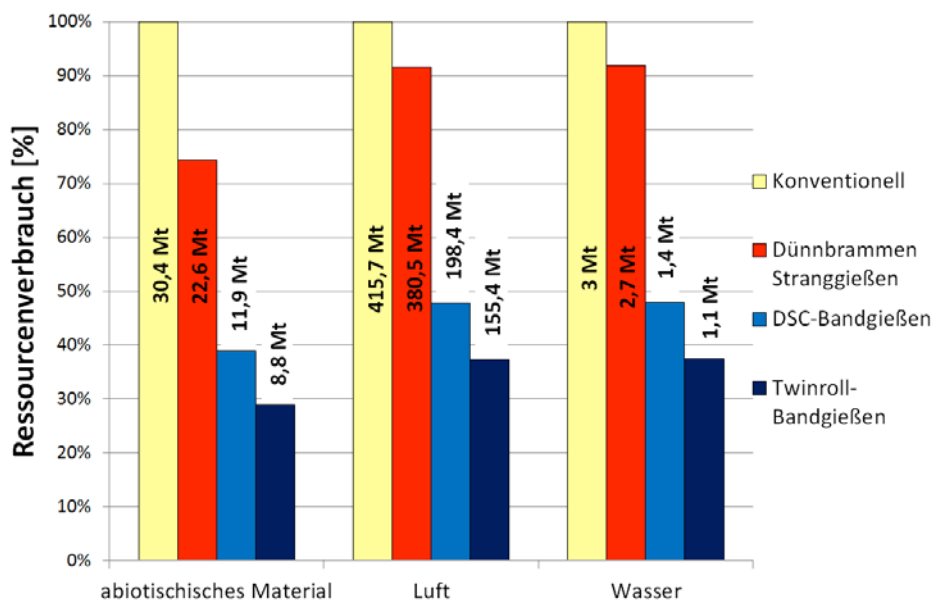
Abb. 76: Energieverbrauch verschiedener Gießwalzanlagen zur Warmbänderzeugung



Quelle: Lüngen 2005

Bei einer jährlichen Produktion an Warmband von 25 Mio. Tonnen in Deutschland pro Jahr (Wirtschaftsnachrichten 2003) ergeben sich die in Abb. 77 dargestellten Ressourceneinsparpotenziale für eine jeweils 100 % Anwendung der Verfahren. Die Einsparungen resultieren vor allem aus dem verringerten Strom und Erdgasverbrauch. Während heute nahezu 100 % der Erzeugnisse nach wie vor über das konventionelle Verfahren des Stranggießens hergestellt werden, sind Anlagen zum Dünnbrammen-Stranggießen noch sehr wenig verbreitet. DSC- und Twinroll-Bandgießanlagen haben die industrielle Reife derzeit noch nicht erreicht. Nach Angaben der Salzgitter AG hat das DSC-Verfahren im Pilotmaßstab einen Entwicklungsstand erreicht, der eine Prozessrealisierung im Produktionsmaßstab und die Produktion von vermarktungsfähigem Material erfolgversprechend erscheinen lässt (Schäperkötter et al. 2005). Im April dieses Jahres hat die Europäische Kommission der Salzgitter Flachstahl GmbH eine Beihilfe von 19,1 Mio. EUR für ein Vorhaben zur Weiterentwicklung des Direct Strip Casting genehmigt. Eine Twinroll-Anlage wurde 1999 bei Thyssen Krupp Nirosta in Krefeld in Betrieb genommen, konnte jedoch auch bis heute ein semi-industrielles Stadium mit geringen monatlichen Gesamterzeugungsmengen nicht überwinden.

Abb. 77: Ressourcenverbrauch von Herstellungsverfahren zur Warmbänderzeugung bezogen auf die Jahresproduktion in Deutschland 2003



Quelle: Eigene Darstellung, Wirtschaftsnachrichten 2003, Lungen 2005

20.3.2 Ressourcenverbrauch verschiedener Stahlerzeugnisse im PKW

Die Szenarien, welche im Rahmen der Arbeit untersucht wurden, sind Tab. 55 zu entnehmen. Tab. 56 zeigt die zugrunde gelegten Daten und den Ressourcenverbrauch für konventionellen Stahl sowie für die HHS, wie sie in dem Projekt UltraLight Steel Auto Body umgesetzt wurden. In der Fahrzeugkarosserie ohne Gewichtsreduzierung werden 266 kg konventioneller Stahl verbaut, der als zusätzliches Legierungselement lediglich Kupfer beinhaltet. Daraus resultiert jedoch im Vergleich zu den HHS ein relativ hoher spezifischer Ressourcenverbrauch. Lediglich der Dogal 500 P und der Dogal

1000 DPX haben aufgrund ihres Molybdängehaltes einen höheren spezifischen Ressourcenverbrauch. Bezogen auf das Fahrzeuggewicht von 266 kg bzw. 200 kg haben die Werkstoffe einen spezifischen Ressourcenverbrauch in t/Fahrzeug von 2,13 abiotisch, 9,86 Wasser und 0,62 Luft beim konventionellen Stahl und 1,54 abiotisch, 7,82 Wasser und 0,49 Luft bei der HSS-Zusammensetzung. Insgesamt haben die Legierungselemente einen relativ kleinen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch.

Tab. 56: Zusammensetzung, Legierungselemente und resultierender Ressourcenverbrauch in t/t für das Vergleichsfahrzeug mit konventionellem Stahl und der Zusammensetzung aus verschiedenen HHS

Bezeichnung nach Studie	Produkt	Lieferant	Gewicht im Fahrzeug [kg]	Gewichtsanteile der Legierungselemente							Ressourcenverbrauch [t/t]				
				Cu	Cr	Ni	Ti	V	Al	Mo	Roheisenanteil	abiotisch	Wasser	Luft	
Konventioneller Stahl															
	Baustahl S235J2	Salzgitter	266	0,55								99,45	7,99	36,97	2,34
Zusammensetzung HHS Stahl															
BH210/340	HX220BD	Salzgitter	6,64						0,02			99,98	7,05	35,96	4,69
BH 260/370	HX260BD	Salzgitter	16,77						0,02			99,98	7,05	35,96	2,34
IF 260/410			1,25									100	7,05	35,86	2,34
DP 280/600	Dogal 800 DP	SSAB	7,84		0,5					0,015		99,485	7,12	38,28	2,36
IF 300/420			5,77									100	7,05	35,86	2,34
DP 300/500	Dogal 500 DP	SSAB	18,14		0,7		0,01	0,02	0,02	0,04		99,21	7,45	39,74	2,36
HSLA 350/450	Dogal 340 LAD	SSAB	2,68				0,01		0,02			99,97	7,05	35,96	2,34
DP 350/600	Dogal 600 DP	SSAB	6,58		0,5				0,02			99,48	7,12	38,31	2,36
DP 400/700	Dogal 800 DP	SSAB	9,14		0,5					0,015		99,485	7,12	38,28	2,36
TRIP 450/800			8,44									100	7,05	35,86	2,34
HSLA 490/600	Dogal 460 LAD	SSAB	1,25				0,01		0,02			99,97	7,05	35,96	2,34
DP 500/800	Dogal 800 DP	SSAB	47,71		0,5					0,015		99,485	7,12	38,28	2,36
SF 570/640			1,25									100	7,05	35,86	2,34
CP 700/800	Dogal 780 CP		1,13		0,5					0,015		99,485	7,12	38,28	2,36
DP 700/1000	Dogal 100 DPX	SSAB	59,32		0,49		0,01	0,02			0,25	99,23	8,97	41,28	2,37
Mart 950/1200	SZMS1200	Salzgitter	6,09		0,6					0,02		99,38	7,14	38,78	2,36
Mart	Docol M 1500	SSAB	1,77				0,025			0,04		99,935	7,06	36,06	2,34
		Summe	201,77												

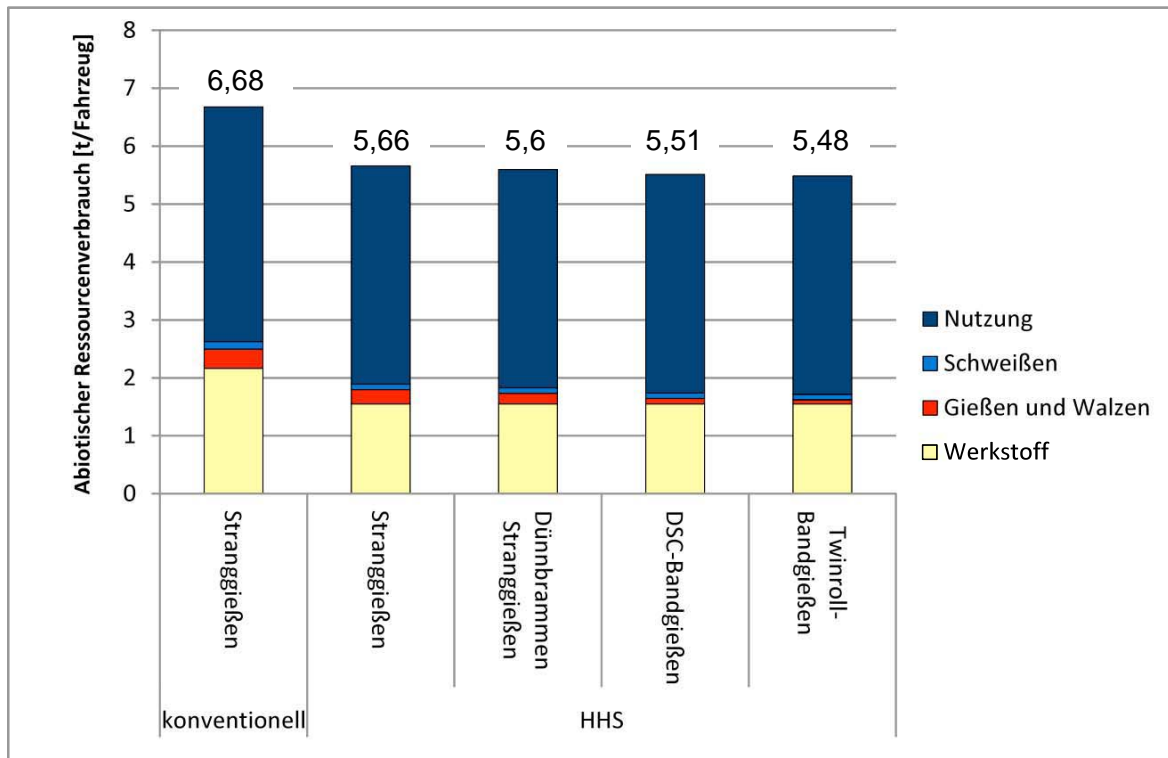
Quelle: Eigene Darstellung

Zur Bestimmung des Ressourcenverbrauchs in der Nutzungsphase wurde in Anlehnung an die genannte Studie eine Laufleistung von 13000 km p.a. bei einer Gesamtlebensdauer von 8 Jahren zugrunde gelegt. Der Kraftstoffverbrauch liegt bei dem Fahrzeug mit der HHS Leichtbaukonstruktion mit 3,2 l/100 km um 0,7 l/100 km unter dem des Fahrzeugs mit der konventionellen Stahlkonstruktion. Die Länge der Schweißnaht wurde beim Leichtbau mit 114 m und beim konventionellen Fahrzeug mit 148 m angenommen. Zum Einsatz kommen Laserschweißen und das MIG/MAG-Schweißen. Die Herstellungsverfahren zur Warmbandherzeugung wurden entsprechend den Angaben in Kapitel 3.1 auf das jeweilige Fahrzeuggewicht bezogen und in die Berechnungen integriert.

In Abb. 78 ist der Verbrauch an abiotischen Ressourcen beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung dargestellt. Grundsätzlich dominiert in allen Szenarien der Ressourcenverbrauch des Fahrzeugs in der Nutzungsphase, wobei das konventionelle Fahrzeug erwartungsgemäß einen höheren Verbrauch aufweist. Am höchsten ist das Ressourceneinsparpotenzial im Bereich der Materialeinsparung durch die Umstellung auf Tailored Blanks mit 0,62 t/Fahrzeug. Erst dann folgt die Ersparnis in der Nutzungsphase. Hier beträgt das Einsparpotenzial 0,28 t/Fahrzeug. Die Verbesserung durch die Anwendung der ressourcenschonenderen Verfahren führt gegenüber dem konventio-

nellen Stranggießen des HHS-Warmbandes beim Dünnbrammen-Stranggießen zu einem Einsparpotenzial von 0,06, beim DSC-Verfahren von 0,15 und beim Twinroll-Bandgießen von 0,18 t/Fahrzeug. Aufgrund der geringeren Schweißaufwendungen sind beim Einsatz von HHS in Form von Tailored Blanks weitere 0,036 t/Fahrzeug einzusparen.

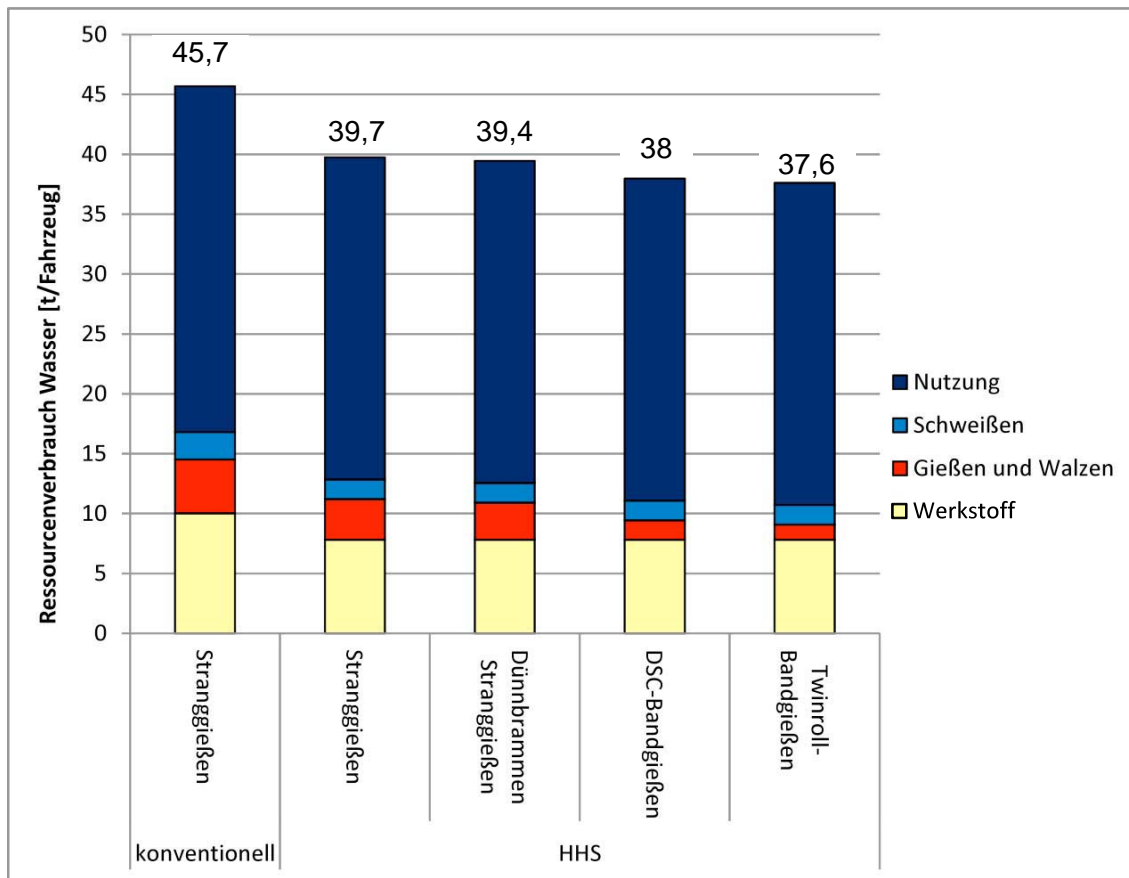
Abb. 78: Verbrauch abiotischer Ressourcen beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung



Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 79 ist der lebenszyklusweite Wasserverbrauch beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung zu entnehmen. Grundsätzlich bestehen beim Wasserverbrauch die gleichen Tendenzen wie bei den abiotischen Ressourcen. Bei der Werkstoffbereitstellung lassen sich die meisten Ressourcen mit 2,19 t/Fahrzeug einsparen. Allerdings bietet bei Wasser das Twinroll-Bandgießverfahren mit 2,11 t/Fahrzeug größere Einsparpotenziale als die Nutzungsphase mit 2 t/Fahrzeug. Gegenüber dem konventionellen Stranggießen der HHS-Erzeugnisse kann man 0,29 durch das Dünnbrammenstranggießen und 1,76 t/Fahrzeug durch das DSC-Verfahren einsparen. Für die Schweißaufwendungen sind beim Einsatz von HHS in Form von Tailored Blanks weitere 0,63 t/Fahrzeug einzusparen.

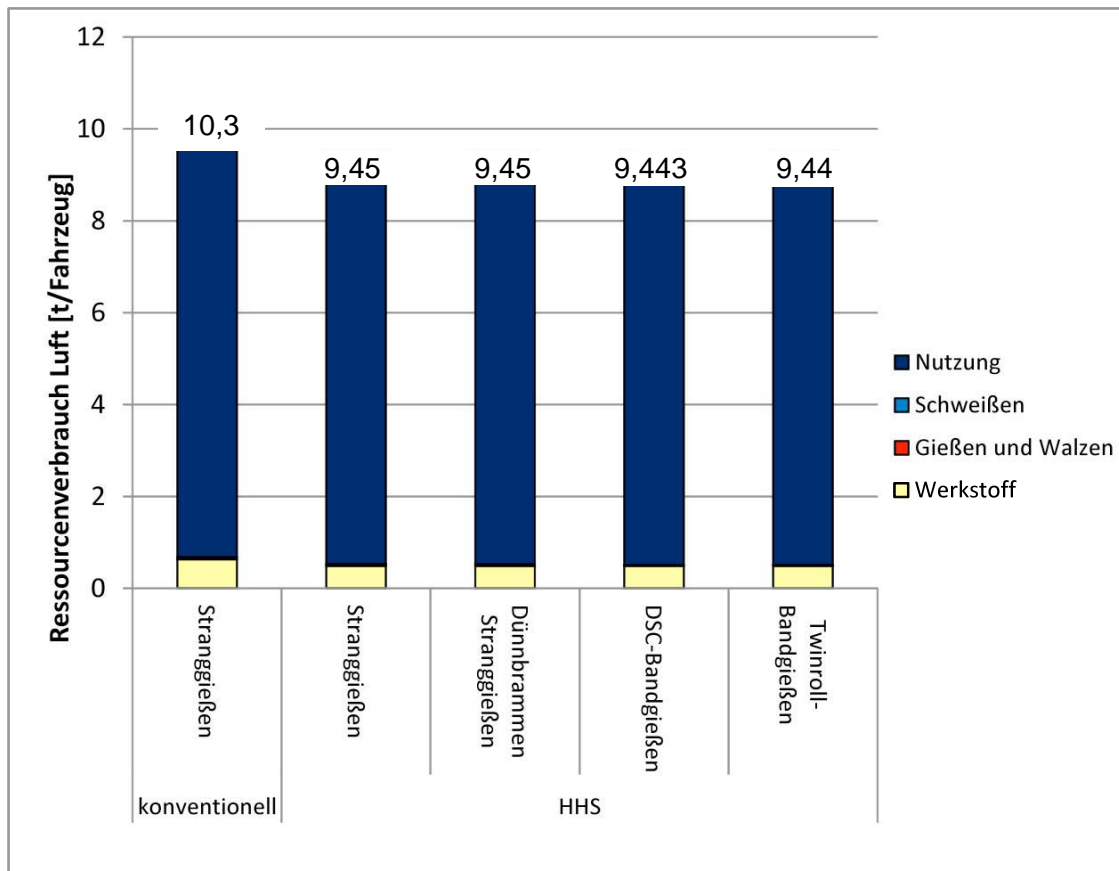
Abb. 79: Wasserverbrauch beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung



Quelle: Eigene Darstellung

In Abb. 80 ist der Ressourcenverbrauch in der Kategorie Luft beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung dargestellt. Aufgrund des dominierenden Luftverbrauchs in der Nutzungsphase haben die anderen Prozesse nur einen sehr geringen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch und sind auch bei allen Szenarien ähnlich. Entsprechend hat das schwere Fahrzeug im Referenzszenario konventioneller Stahl/Strangguss den größten Luftverbrauch.

Abb. 80: Luftverbrauch beim Einsatz konventionellen Stahls und einer Zusammensetzung aus HHS bei verschiedenen Verfahren zur Warmbandherstellung



Quelle: Eigene Darstellung

20.4 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Innovative Verfahren des Bandgießens bergen ein großes Potenzial, die Ressourcenverbräuche bei der Herstellung von Warmbandstahl signifikant zu senken. An diesen Verfahren wird bereits seit geraumer Zeit geforscht. Bis heute stehen lediglich Pilotanlagen zur Verfügung, deren Weiterentwicklung seit Beginn des Jahres von der Europäischen Kommission bei der Salzgitter AG gefördert werden. Eine Prognose zum Erfolg dieser Arbeiten kann an dieser Stelle nicht gegeben werden. Die Frage inwieweit eine weitere Förderung sinnvoll ist, muss auch unbeantwortet bleiben.

Prinzipiell ist festzustellen, dass Unternehmen derzeit nicht das Ziel haben das Stranggießen durch Dünnbrammen-Stranggießen oder Bandgießverfahren zu ersetzen. Die stahlverarbeitenden Unternehmen ziehen Bandgießverfahren aber auch das Dünnbrammen-Stranggießen in Erwägung, wenn es darum geht Kapazitätserweiterungen im geringen Umfang vorzunehmen oder aber HHS höherer Güten zu produzieren. Bei Kapazitätserweiterungen ist jedoch immer noch die Modernisierung und Umrüstung bestehender konventioneller Anlagen die erste Option vor der Investition in Dünnbrammen-Stranggießanlagen. Um an dieser Stelle den Ressourcenverbrauch zu sen-

ken, könnte bei Kapazitätserweiterungen eine Förderung von Investitionen in Dünnbrammen-Stranggießen zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs beitragen.

Die Anwendung von HHS in Tailored Blanks zeigt, dass der Ressourcenverbrauch vor allem durch den verringerten Materialeinsatz und dem daraus resultierenden verringerten Fahrzeuggewicht und Kraftstoffverbrauch signifikant reduziert werden kann. Der Einsatz von HHS ist daher zu befürworten. Da jedoch nahezu alle Automobilhersteller den Leichtbau ihrer Fahrzeuge forcieren, kann an dieser Stelle keine Einschätzung darüber abgegeben werden, inwieweit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dazu der staatlichen Förderung bedürfen. Prinzipiell ließe sich der derzeitige Anteil von ca. 7% auf ca. 15% auch ohne weitere Entwicklungsarbeiten verdoppeln. Im Moment scheint der vermehrte Einsatz dadurch gehemmt zu sein, dass nach wie vor von sehr hohen Kosten durch das Laserschweißen ausgegangen wird, wobei die Kosten für das Verschweißen der Platinen in den letzten Jahren auf 1/10 gesenkt werden konnten. Darüber hinaus hat diese Art des Leichtbaus durch einen Benchmark, bei der eine Tür aus TB teurer und schwerer war als andere, konventionelle Türen, einen Dämpfer bekommen. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der verstärkten Nachfrage nach kraftstoffverbrauchsreduzierten Fahrzeugen seitens der Kunden und hinsichtlich des Drucks der verantwortlichen politischen Stellen, besteht jedoch der Grund zur Annahme, dass die Automobilhersteller den bereits eingeschlagenen Weg des Leichtbaus unter Einsatz von HHS in Tailored Blanks im eigenen Interesse weitertreiben werden. Entsprechend kann mit einer Erhöhung der Anteile von Tailored Blanks im Automobilbau gerechnet werden. Ein weiteres Argument dafür sind die bei entsprechender Umsetzung reduzierten Herstellkosten der Fahrzeuge. Der Einsatz von Tailored Blanks stellt prinzipiell eine besonders günstige Form des Leichtbaus dar. Ein anderes Anwendungsfeld für Tailored Blanks stellen Container dar, bei dem bereits ähnliche Einsparpotenziale im Bereich der Materialaufwendungen und des Kraftstoffverbrauchs aufgezeigt werden konnten. In Tab. 57 eine zusammenfassende Bewertung nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien dargestellt.

Tab. 57: Zusammenfassende Bewertung nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Verfahren zur Warmbandherstellung	HHS im Automobilbau
Ressourceneinsatz	Stahl ist als Werkstoff weitverbreitet, daher Thematisierung relevant.	Hoch relevant, denn Stahl ist ein bedeutender Werkstoff im Automobilbau und Leichtbaubestrebungen verbreitet.
Ressourceneffizienzpotenzial	Hoch, durch Weiterentwicklung der Verfahren zum Bandgießen zwischen 60 und 70%.	Hoch, durch Kraftstoffeinsparungen und Materialreduktion.
Sonstige Umweltauswirkungen	Positive Auswirkungen auf Primärenergieverbrauch, CO ₂ -Emissionen und andere Umweltwirkungen.	Positive Auswirkungen auf Primärenergieverbrauch, CO ₂ -Emissionen und andere Umweltwirkungen. Negative Einflüsse durch die Verwendung der speziellen Legierungselemente wurden noch nicht untersucht.
Realisierbarkeit	Abhängig von den Erfolgen bei der technischen Weiterentwicklung der Verfahren zum Bandgießen. Darüber hinaus stark beeinflusst durch die wirtschaftliche Darstellbarkeit bei Neuinvestitionen. Derzeit noch keine Option zu größeren Substitutionen.	Die Realisierbarkeit konnte bereits bei der Anwendung in Serienfahrzeugen aufgezeigt werden. HHS als Tailored Blanks werden bereits verstärkt in PKW eingesetzt.
Wirtschaftliche Bedeutung	Hohe Bedeutung, da möglicher Beitrag zur Wettbewerbs-sicherung der Stahlproduzenten in Deutschland. Verfahren zum Bandgießen teilweise deutlich wirtschaftlicher als konventionelle Verfahren. Hemmnis durch hohe Erstinvestitionen, Modernisierung bestehender Anlagen als erste Option.	Bedeutung zur Wettbewerbssicherung der Automobilisten in Deutschland durch Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und günstigere Stahlbauteile.
Kommunizierbarkeit	Stellt kein Hindernis dar.	Stellt kein Hindernis dar.
Übertragbarkeit	Bandgießverfahren lassen sich auf alle Warmbänderzeugnisse übertragen.	Übertragbarkeit auf Container, LKW, Flugzeuge, Züge und Schiffe gegeben.

Quelle: eigene Darstellung

20.5 Quellenverzeichnis

Automotive (R)EVOLUTION in steel, 1. Auflage 2002, ISSN 0175-2006.

Boston Consulting Group (2009): CO₂Bilanz Stahl – Ein Beitrag zum Klimaschutz; Studie im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Lüngen, H.-B. (2005): Technische Entwicklungen in der Stahlindustrie verringern CO₂-Emissionen, vorgetragen auf der Fachkonferenz „Rheinklima – die Zukunftsfähigkeit eines europäischen Wirtschaftsraumes im Wandel des Klimas, eine Veranstaltung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn.

Ritthoff, M. et al. (2002): MIPS berechnen – Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen.

Schäperkötter, M.; Eichholz, H.; Kroos, J.; Niemeyer, M.; Schmidt-Jürgensen, R.; Spitzer, K.-H.: "Direct Strip Casting (DSC) - an option for the production of HSD steel grades"; Konferenzbeitrag, S. 188, 1st International Conference Super-high Strength Steels, 02.-04.11.2005, Rom.

Wemenn, K. (1999): ESAB Welding Equipment AB, Laxa, Schweden, Svetsaren No. 1.

Wirtschaftsnachrichten, Stahl und Eisen, 123 (2003), No. 3, p. 100.

21 Ressourceneffizienzpotenziale durch „Nutzen statt Besitzen“ bei Montageanlagen

Piotr Pacholak (Technische Universität Berlin)

Martin Grismajer (Technische Universität Berlin / Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb)

Timo Fleschutz (Technische Universität Berlin / Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb)

21.1 Einleitung

Seit dem Beginn des Industriezeitalters haben der private Konsum und das Privateigentum stark zugenommen. Das hat eine zunehmende Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und ein steigendes Abfallaufkommen zur Folge. Die Idee des „Nutzen statt Besitzen“ stellt sich dem entgegen und soll gleichzeitig Wirtschaftsaktivitäten und Ressourceneinsparung ermöglichen. Im privaten Sektor werden bereits unterschiedliche Geschäftsideen nach dem Prinzip „Nutzen statt Besitzen“ realisiert, zum Beispiel Car-Sharing und Leasing. Im industriellen Bereich sind diese weniger verbreitet und es liegen wenige Analyseergebnisse hinsichtlich ihrer Auswirkungen vor.

Ziel dieser Untersuchung war der Vergleich des Ressourcenverbrauchs beim Einsatz von Montageanlagen im heute verbreiteten traditionellen, auf Anlagenverkauf basierenden Geschäftsmodell und in einem Product-Service System (PSS) mit Nutzenverkauf. Es soll gezeigt werden, inwieweit das Prinzip „Nutzen statt Besitzen“ zur Ressourcenschonung bei Industriegütern beitragen kann. Der Schwerpunkt des PSS liegt dabei in der Verlängerung der Lebensdauer der Montageanlagen.

21.2 Vorgehensweise

Um die Ressourceneffizienzpotenziale des Geschäftsmodells „Nutzen statt Besitzen“ bei Montageanlagen zu quantifizieren, wurde exemplarisch eine Analyse auf Basis des MIPS-Konzepts für ein Szenario ohne PSS und ein Szenario mit PSS am Beispiel Industrieroboter durchgeführt (Pacholak 2010).

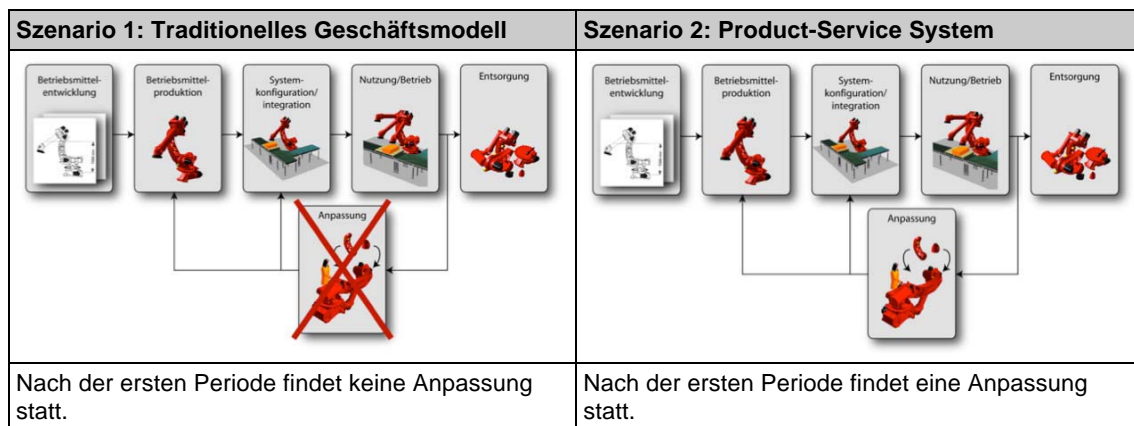
21.2.1 Untersuchte Geschäftsmodelle

Das traditionelle Geschäftsmodell basiert auf den heute üblichen Markttransaktionen. Hierbei wird bei einem Verkaufsgeschäft das Betriebsmittel entwickelt, produziert, konfiguriert, integriert, genutzt und schließlich entsorgt. Die wesentliche Herstellerverantwortung endet meist mit Ablauf der Garantie. Erreicht das Betriebsmittel das Ende seiner Lebensdauer oder ändern sich die Anforderungen des Kunden, so wird üblicherweise ein neues erworben.

Das PSS stellt eine ressourcenschonende Alternative dar. Der Kunde bezahlt dabei für die Nutzung des Betriebsmittels statt für das Betriebsmittel selbst. Er wird dabei nicht zum eigentlichen Besitzer der Produktionsanlage. Der Anbieter übernimmt die Verantwortung für den kompletten Produktlebenszyklus des Betriebsmittels und stellt den Nutzen für den Kunden bereit. Das Prinzip ist, dass der Anbieter effizientere Anlagen entwickelt, die langfristig und flexibel weiter- oder wiederverwendet werden können. Zuverlässigkeit, Flexibilität und Umrüstbarkeit stehen dabei im Vordergrund. Das PSS unterscheidet sich von dem traditionellen Geschäftsmodell dadurch, dass nach einer ersten Nutzungsphase eine Anpassung stattfindet, die eine neue Verwendung auf dem gleichen oder auf einem anderen Einsatzgebiet ermöglicht. Im Idealfall kann das Betriebsmittel mehrfach angepasst und weiter- oder wiederverwendet werden. Ressourceneinsparungen kommen dadurch zu Stande, dass für neue Einsatzzwecke nicht vollständig neue Betriebsmittel hergestellt werden müssen, sondern eine ressourcenschonende Anpassung stattfindet (Tab. 58).

Als Untersuchungsobjekt für beide Szenarien dient ein Standard-Industrieroboter mittlerer Leistung, angelehnt an das Modell KR-200 der Firma KUKA AG mit sechs Achsen. Dieser ist durch seine Auslegung für mittlere bis höhere Traglasten und durch die Wahl passender Werkzeuge vielseitig einsetzbar, z. B. in den Bereichen Punktschweißen und Handhabung.

Tab. 58: Vergleich der untersuchten Szenarien „Traditionelles Geschäftsmodell“ und „Product-Service System“ mit schematischer Darstellung



Quelle: Eigene Darstellung

21.2.2 Definition der Serviceeinheit

Als Serviceeinheit die Bereitstellung eines Industrieroboters für eine Nutzungsperiode von acht Jahren gewählt. Der Nutzungszeitraum von acht Jahren unterteilt sich dabei in zwei Perioden zu je vier Jahren. Diese Periodendauer wurde gewählt, um einen Maschinenparkwechsel, bedingt durch einen Modellwechsel beim herzustellenden Produkt (z. B. Kraftfahrzeug), darzustellen.

21.2.3 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Aufgrund der begrenzt verfügbaren Daten zum Lebenszyklus werden in beiden Szenarien nur die Phasen Roboterherstellung und -nutzung betrachtet. Im PSS kommt noch die Phase der Anpassung hinzu. Für das Szenario „Traditionelles Geschäftsmodell“ werden die Roboterherstellung (inkl. Musterwerkzeug angelehnt an einen Greifer sowie Batterie im Steuerschrank) zweifach und 8 Jahre elektrische Energie für den Betrieb einbezogen. Für das Szenario „PSS“ werden die Roboterherstellung (inkl. Musterwerkzeug und Batterie im Steuerschrank) einfach, einmal die Herstellung von Musterwerkzeug und Batterie im Steuerschrank für die Anpassung und 8 Jahre elektrische Energie für den Betrieb einbezogen.

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Es werden keine Transporte zwischen den einzelnen Lebensphasen betrachtet.
- Für die Herstellung des Roboters werden nur die Materialintensitäten der enthaltenen Materialien und damit auch deren Vorketten berücksichtigt.
- Weitere Hilfs- und Betriebsstoffe werden nicht berücksichtigt (auch nicht für die Phase der Nutzung).
- Die erforderliche elektrische Energie für den Betrieb des Roboters in der Phase der Nutzung wird betrachtet und von 250 Arbeitstagen im Jahr mit Zweischicht-Betrieb ausgegangen, bei einem Verhältnis von Bewegung zu Ruhezustand 70/30.
- Eine mögliche Verbesserung der Energieeffizienz des Austausch- oder des angepassten Gerätes wird nicht betrachtet.
- Für die Phase der Anpassung wird der Materialaufwand für die Herstellung der Austauschkomponenten Batterie und Musterwerkzeug betrachtet. Weitere Inputs, wie z. B. Hilfs- und Betriebsstoffe und Transporte im Rahmen der Anpassung, werden nicht betrachtet.
- Die Aufwände für Demontage und Recycling werden nicht betrachtet.

21.2.4 Datenerfassung

Die Annahmen zur Zusammensetzung des Roboters und zur typischen Nutzungsweise basieren auf Vergleichswerten zu anderen Robotern und Expertenmeinungen. Aufgrund der schwierigen Datenlage wurde die Berechnung dahingehend vereinfacht, dass Materialintensitäten anhand der im Roboter vorhandenen Materialien und Mengen berechnet wurden. Diese Methode wird beim MIPS-Verfahren häufig angewandt (Ritthoff et al. 2002).

Für den Roboter wurden Komponenten, Materialien und Massen aus Produktdokumentationen, Fachliteratur sowie Expertenmeinungen ermittelt. Für die Ermittlung der Gewichtsanteile wurden ein kleinerer Industrieroboter Modell KR-150 der Firma KUKA AG analysiert und dessen Werte für den betrachteten Typ skaliert. Dabei wurden die Komponenten Roboterarme und -gelenke, Sockel, Verkleidungen, Kabelbaum, Kugellager, Elektronik, Batterien und Musterwerkzeug betrachtet und die Werkstoffe

Stahl, Edelstahl, Kupfer, Aluminium und Polyvinylchlorid/Acrylnitril-Butadien-Styrol berücksichtigt.

Die Daten für die Steuerungselektronik (ca. 10 kg) wurden angelehnt an Aussagen zur Materialintensität eines Notebooks (Moisio et al. 2008) abgeschätzt. In Anlehnung an Ortiz 2006 wurden die Inhaltsstoffe eines Bleiakkus (ca. 10 kg) und deren Mengenan-teile ermittelt. Zur Ermittlung des Stromverbrauchs des KR-200 wurden Werte des KR-150 skaliert, die bei Testläufen an der Technischen Universität Berlin ermittelt wurden. Für die Berechnung des Ressourcenverbrauchs bei der Stromerzeugung wurden Ma-terialintensitäten für den Strommix im öffentlichen deutschen Stromnetz verwendet (Lettenmeier et al. 2009).

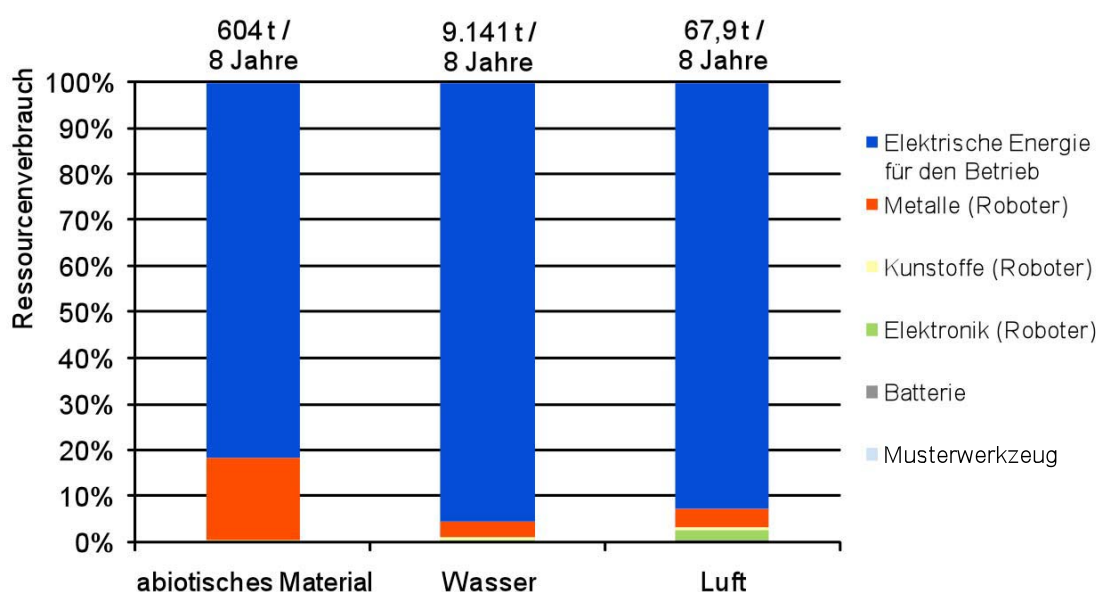
21.3 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse

Aus den in der Sachbilanz ermittelten Materialien des Roboters und der erforderlichen Energie für dessen Betrieb wurde unter Einbezug der vorgelagerten Stoffströme für beide Szenarien der Ressourcenverbrauch in den Kategorien „abiotische Materialien“, „Wasser“ und „Luft“ abgeschätzt.

21.3.1 Ressourcenverbrauch im traditionellen Geschäftsmodell

Im traditionellen Geschäftsmodell werden für acht Jahre Bereitstellung des Roboters 604 t abiotisches Material, 9.141 t Wasser und 67,9 t Luft verbraucht. Eine prozentuale Aufteilung des Ressourcenverbrauchs nach den MIPS-Kategorien bezogen auf die Bestandteile des Roboters und die elektrische Energie für dessen Betrieb ist in Abb. 81 dargestellt.

Abb. 81: Ressourcenverbrauch und Anteile für die Herstellung der Komponenten sowie die elektrische Energie für den Betrieb an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für das traditionelle Geschäftsmodell



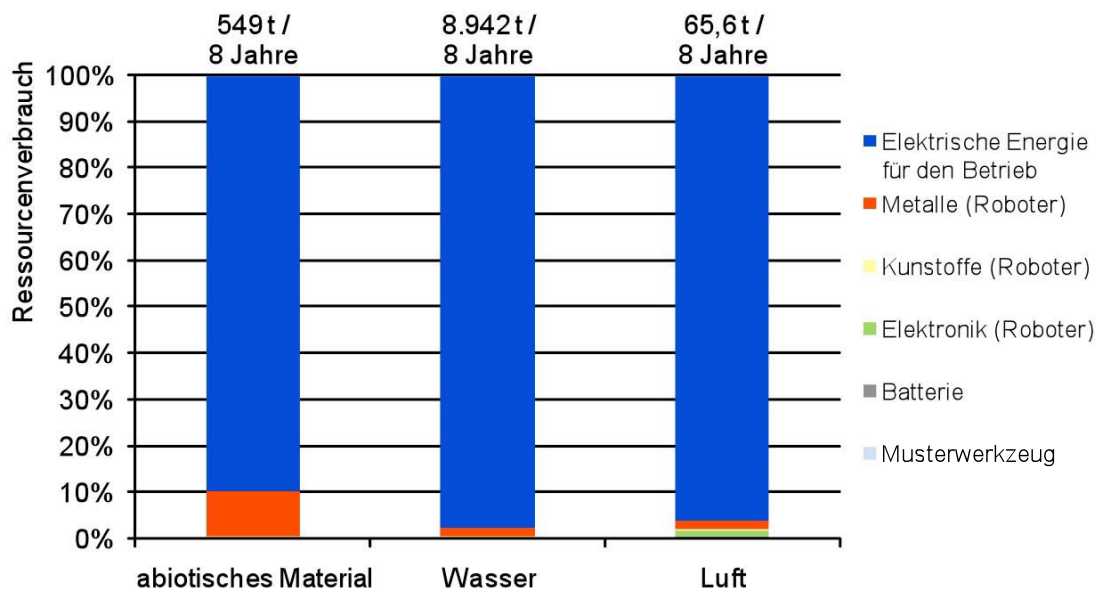
Quelle: nach Pacholak 2010

Hierbei wird der vergleichsweise große Einfluss der für den Betrieb erforderlichen elektrischen Energie in allen drei Kategorien mit einem Anteil zwischen 82 und 95% deutlich. Bei den abiotischen Materialien wirkt sich die Herstellung der metallischen Komponenten des Roboters mit 18% aus, die Beiträge der weiteren betrachteten Bestandteile sind sehr gering. Wasser- und Luftverbrauch werden nicht wesentlich durch die Herstellung der betrachteten Komponenten des Roboters beeinflusst.

21.3.2 Ressourcenverbrauch im Product-Service System

Im PSS werden für acht Jahre Bereitstellung des Roboters 549 t abiotisches Material, 8.942 t Wasser und 65,6 t Luft verbraucht. Die prozentuale Aufteilung des Ressourcenverbrauchs ist in Abb. 82 dargestellt.

Abb. 82: Ressourcenverbrauch und Anteile für die Herstellung der Komponenten sowie die elektrische Energie für den Betrieb an dem Ressourcenverbrauch innerhalb der Ressourcenkategorien für das Product-Service System



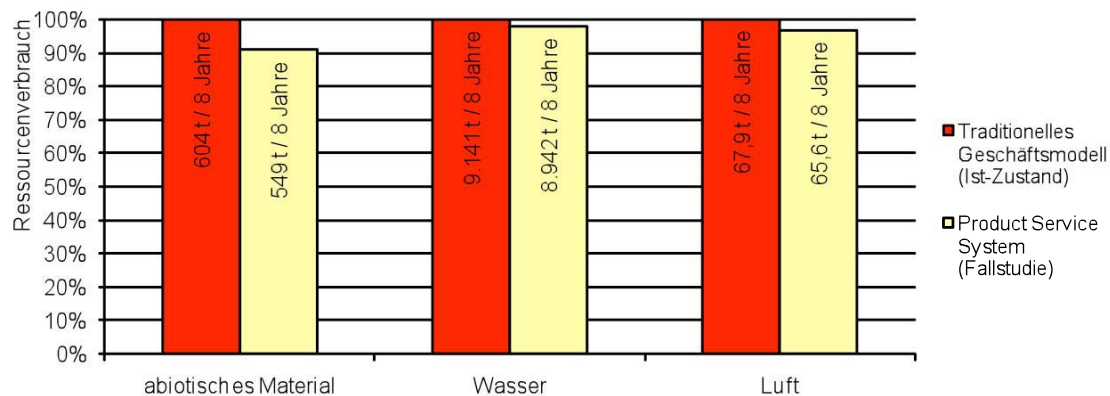
Quelle: nach Pacholak 2010

Gegenüber dem traditionellen Geschäftsmodell steigt der Einfluss der elektrischen Energie für den Betrieb des Roboters in allen betrachteten Kategorien weiter auf 90 bis 97%. Grund ist der sinkende absolute Ressourcenaufwand insgesamt wegen des geringeren Aufwands für die Herstellung eines Roboters anstatt zwei Robotern im traditionellen Geschäftsmodell. Der Energieverbrauch für die Nutzung über die 8 Jahre wurde mit dem im traditionellen Geschäftsmodell übereinstimmend angenommen. Der Einfluss der Herstellung der meisten Komponenten sinkt, nur der von Batterie und Musterwerkzeug steigt, weil für diese ein Austausch nach vier Jahren angenommen wurde. Deren nach wie vor geringe Beiträge verändern das Gesamtbild nicht.

21.4 Ergebnisse der Potenzialanalyse

Aufgrund des geringeren Materialaufwands für die Herstellung nur noch eines anstatt zweier Roboter im Zeitraum von acht Jahren wird von einer Verringerung des Ressourcenaufwands beim Übergang zu einem PSS ausgegangen (siehe Abb. 83).

Abb. 83: Vergleich des Ressourcenverbrauchs des Szenarios „Product-Service System“ bezogen auf das Szenario „Traditionelles Geschäftsmodell“ in den drei Ressourcenkategorien



Quelle: Pacholak 2010

Für eine Anlage mit einem Roboter werden Einsparungen in Höhe von 55 t abiotisches Material, 199 t Wasser und 2,3 t Luft abgeschätzt (siehe Tab. 59). Dies würde einer relativen Einsparung der abiotischen Materialien um 9,1%, des Wassers um 2,2% und der Luft um 3,4% gegenüber dem traditionellen Geschäftsmodell entsprechen.

Tab. 59: Ressourcenverbrauch und Einsparpotenzial der untersuchten Szenarien

Ressourcenverbrauch			
Szenario	abiotisches Material	Wasser	Luft
Traditionelles Geschäftsmodell	604 t / 8 Jahre	9.141 t / 8 Jahre	67,9 t / 8 Jahre
Product-Service System	549 t / 8 Jahre	8.942 t / 8 Jahre	65,6 t / 8 Jahre
Einsparpotenzial			
Typ des Einsparpotenzials	abiotisches Material	Wasser	Luft
absolute Einsparung (Differenz)	55 t / 8 Jahre	199 t / 8 Jahre	2,3 t / 8 Jahre
relative Einsparung (prozentual auf das traditionelle Geschäftsmodell bezogen)	9,1%	2,2%	3,4%

Quelle: nach Pacholak 2010

Würde der große Einfluss der elektrischen Energie für den Betrieb des Roboters nicht mit betrachtet, so wären die relativen Einsparungen 49,3% bei den abiotischen Materialien, 46,7% in der Kategorie „Wasser“ und 46,7% in der Kategorie „Luft“. Der Einfluss des gesunkenen Ressourcenaufwands – etwa eine Halbierung – durch die Einsparung eines von zwei Robotern in acht Jahren und der Aufwand für die Austauschkomponenten Batterie und Musterwerkzeug wären so deutlicher zu sehen.

Für die Berechnung der Auswirkungen auf Deutschland könnten die für einen Roboter ermittelten Einsparpotenziale und eine vermutete zukünftige Zahl von Neuinstallationen herangezogen werden. Für eine solche Abschätzung müssten jedoch beispielsweise Typenvielfalt und unterschiedliche mögliche und geforderte Nutzungszeiten berücksichtigt werden, wofür tiefergehende Analysen erforderlich sind.

21.5 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Tab. 60: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Szenarien nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Traditionelles Geschäftsmodell	Product-Service System
Ressourceneinsatz	Höher als beim Product-Service System	Niedriger als beim traditionellen Geschäftsmodell.
Ressourceneffizienzpotenzial	Gering. Mit Zunahme der Neuinstallationen steigt der Ressourcenverbrauch.	Höher. Durch Verlängerung der Lebensdauer und Umrüstung für andere Einsatzzwecke sinkt die Notwendigkeit der Produktion neuer Anlagen.
Sonstige Umweltauswirkungen	Bei Installation, Wartung und Reparaturen fallen Transporte an. Des Weiteren werden Stoffe zur Reinigung verwendet, die ggf. toxisch sind. Bei hydraulischen Roboterwerkzeugen erfolgen Austausch / Entsorgung von Hydrauliköl.	Siehe traditionelles Geschäftsmodell. Zusätzliche Umweltauswirkungen bei Umrüstung, z. B. durch Transporte, Austausch der Batterien und Werkzeuge, Reinigung, dafür kleinere Umweltauswirkungen durch kleineren Material- und Entsorgungsbedarf.
Realisierbarkeit	Heutzutage übliche Praxis	Schwierig, hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen, da Messung des Geschäftserfolgs eines Unternehmens bisher wesentlich nach Absatzzahlen erfolgt.
Wirtschaftliche Bedeutung	Hoch, da Wirtschaft in der BRD exportorientiert	Zukünftig wachsend, da stetig wachsender Mehrabsatz von Neuprodukten auf Grund gesättigter Märkte schwieriger werden könnten. Weiterhin ein Trend: Entstehung neuer Arbeitsplätze in Zukunft im Dienstleistungssektor, z. B. in PSS
Kommunizierbarkeit	Unproblematisch, da übliche Praxis	Einschätzung: Anbieter: schwierig, auf Grund der absatzorientierten Wirtschaft. Kunde: einfach, da flexible Nutzung gefördert wird und Abrechnung nach Nutzung möglich ist. Zusätzlich Senkung der finanziellen Einstiegsbarriere
Übertragbarkeit	Unproblematisch, da übliche Praxis	Prinzip im Industriesektor auch auf andere Maschinen/Anlagen übertragbar. Im Privatssektor eingeschränkt möglich, da Kunden das „Besitzen“ von Produkten gewohnt sind. Bisher nur teilweise Akzeptanz, z. B. beim Car Sharing

Quelle: Auf Basis von Pacholak 2010

Durch das Prinzip des Product-Service Systems mit der Idee einer möglichst langen Betriebsmittelnutzung werden Potenziale zur Ressourceneinsparung geschaffen. Die quantitative Untersuchung des Fallbeispiels nach den MIPS-Kategorien „abiotische Materialien“, „Wasser“ und „Luft“ zeigt, dass deren Einsatz dazu beitragen kann, die Ressourcenproduktivität zu erhöhen. Eine qualitative Bewertung unter Einbezug weiterer Kriterien ist in Tab. 60 zusammengefasst.

Durch die Anpassung von Betriebsmitteln und deren Weiter- oder Wiederverwendung wird der Betriebsmittellebenszyklus verlängert und die Notwendigkeit der ressourcenaufwändigen Herstellung neuer Anlagen reduziert. Dem gegenüber steht jedoch der hohe Energieverbrauch der Anlagen während ihres Betriebs. Der Ressourcenverbrauch zur Erzeugung der elektrischen Energie übertrifft den Verbrauch zur Herstellung der Anlagen im betrachteten Fallbeispiel um ein Vielfaches. Die Einsparungen in den Kategorien „abiotische Materialien“, „Wasser“ und „Luft“ können möglicher Weise gesteigert werden, wenn insbesondere die Energieeffizienz der Anlagen durch neue Technologien und Strategien verbessert wird. Wenn beim PSS der Nutzer dem Anbieter auch für den Energieverbrauch der Anlagen zahlt, könnte für den Hersteller ein Anreiz zur Senkung des Energieverbrauchs neuer oder angepasster Anlagen entstehen. Am deutlichsten würde der Ressourcenverbrauch in den betrachteten Szenarien sinken, wenn die Anlagen mit Strom aus erneuerbaren Energien, z. B. Windstrom, betrieben würde, da dieser deutlich weniger ressourcenintensiv als der durchschnittliche Netzstrom ist (s. Wiesen 2010).

Aus den Ergebnissen werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet: Es lässt sich vermuten, dass strengere Richtlinien zur umweltgerechten Entsorgung von Produktionsanlagen die Entstehung von Geschäftsmodellen wie PSS fördern könnten. Das aktuell verbreitete Vorgehen der Bewertung des Geschäftserfolgs von produzierenden Unternehmen auch nach Absatzzahlen erschwert die Entstehung neuer Geschäftsmodelle im industriellen Bereich, deren Schwerpunkt nicht die Steigerung des Absatzes ist. Die Bewertung in der Industrie könnte angelehnt an Softwareunternehmen erfolgen, z. B. anhand abgeschlossener Dienstleistungsverträge in Bereichen wie Lizenzierung, Support und Upgrades.

Anlagenbetreiber müssten offen für nutzenorientierte Geschäftsmodelle sein, lassen sich vermutlich aber durch niedrige finanzielle Einstiegshürden zur Nutzung moderner und leistungsfähiger Montageanlagen überzeugen. Weitere Argumente können sich aus der Bezahlung entsprechend der Nutzung und langfristigen Support durch den Anbieter ergeben. Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen könnten ermitteln, wie auch klein- und mittelständische Unternehmen mit ggf. geringerer Anlagenauslastung von PSS profitieren können und welche Geschäftsmodelle sich hierfür eignen, bspw. durch gemeinsame Nutzung durch mehrere Unternehmen. Hierbei könnten auch Systemintegratoren einbezogen werden.

In technischer Hinsicht sollte die Entwicklung flexibler, leicht umrüstbarer sowie mit geringem Aufwand montier- und demontierbarer Montageanlagen vorangetrieben werden, damit ein breites mögliches Einsatzspektrum zu einer langen Weiter- oder Wiederverwendung führen kann. Eine Modularisierung von Anlagen kann den

einfachen Austausch defekter oder veralteter Komponenten ermöglichen. Weiterhin sollte die Materialforschung im Hinblick auf einfache Recyclingfähigkeit vorangetrieben werden. Forschungsbedarf zeigt sich außerdem hinsichtlich des Ressourcenaufwands der elektrischen Energie für den Betrieb von Produktionsanlagen, der durch Einsparungen auf Anlagenseite oder Veränderungen auf der Energieanbieterseite bzw. beim Einkauf der Energie erzielt werden könnte.

Weitere Untersuchungen sollten Hilfs- und Betriebsstoffe mit berücksichtigen sowie den Ressourcenaufwand für die Prozesse Roboterherstellung, Anpassung, Demontage und Recycling. Interessant wäre außerdem eine Analyse hinsichtlich Rebound-Effekten, beispielsweise durch ggf. weniger sorgsamem Umgang der Betreiber mit den Produktionsanlagen wegen der Übertragung der Verantwortung für den störungsfreien Betrieb an den Anbieter des PSS und damit höheren Ressourcenaufwand für die Instandhaltung. Weitere Rebound-Effekte könnten sich durch lange Nutzung von Anlagen ergeben, die z. B. hinsichtlich ihrer Energieeffizienz nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Vorstellbar ist auch eine Erhöhung der Anzahl installierter Anlagen wegen der möglichen Verringerung der finanziellen Einstiegshürde durch den Verkauf des Nutzens statt der Anlage. Letztgenannter Effekt könnte zu einer höheren Anzahl hergestellter Produkte führen, deren Ressourcenaufwand die Einsparungen möglicherweise übertrifft. Es wird empfohlen, weitere Akteurskonstellationen und Service- sowie Betreibermodelle zu untersuchen, beispielsweise im Hinblick auf eine Lebensdauererweiterung auch im traditionellen Geschäftsmodell.

21.6 Quellenverzeichnis

- Lettenmeier, M.; Rohn, H.; Liedtke, C.; Schmidt-Bleek, F (2009): Resource productivity in 7 steps, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.
- Moisio, T.; Lähteenoja, S.; Lettenmeier, M. (2008): TavaramIPS – Kodin tavaroiden luonnonvarojen kulutuksen arviointi (Goods MIPS – Assessing the use of natural resources in household goods. In Finnish). Publications of the National Consumer Research Centre, Helsinki, 6/2008.
- Ortiz, I. M. (2006): Life Cycle Assessment as a Tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment, PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Pacholak, P. (2010): Ressourceneffizienzpotenziale durch neuartige Formen von „Nutzen statt Besitzen“ bei Montageanlagen. Diplomarbeit, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb.
- Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen, Wuppertal Spezial Nr. 27, 54.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien – Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Wiesen, K (2010): Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der regenerativen Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland. Projektbericht, Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse.

22 Ressourceneffizienzpotenziale durch Production on demand

Simon Kim (Universität Stuttgart / Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement)

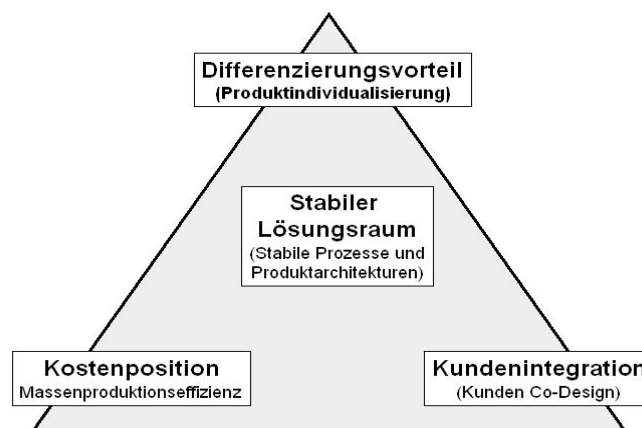
Benjamin Kuhrke (Technische Universität Darmstadt / Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen / Gruppenleiter Umweltgerechte Produktion)

22.1 Einleitung

Die klassische Auftragsfertigung, bei der die Produktion erst nach Auftragseingang beginnt, blieb lange Zeit den Einzel- und Kleinserienfertigern vorbehalten. Seit einigen Jahren kann man jedoch beobachten, dass auch Großserien- und Massenhersteller versuchen, Ansätze zu übernehmen und in ihre Produktionssysteme zu integrieren. Diese Übertragung der Auftragsfertigung in die Großserien- und Massenherstellung wird auch als „Production on Demand“ (POD) bezeichnet, deren Ressourceneinsparpotenziale Gegenstand dieser Studie sind.

Ursprünglich war die gestiegene Individualisierung der Kundenwünsche Ursache für das Interesse der Hersteller von Serienprodukten an der Auftragsfertigung. Die Möglichkeit zur genauen und effizienten Marktforschung ermöglicht zudem eine verstärkte Kundenintegration in den Designprozess, was auch als Motivation angesehen werden kann (Abb. 84).

Abb. 84: Wettbewerbsvorteile mittels Production on demand.

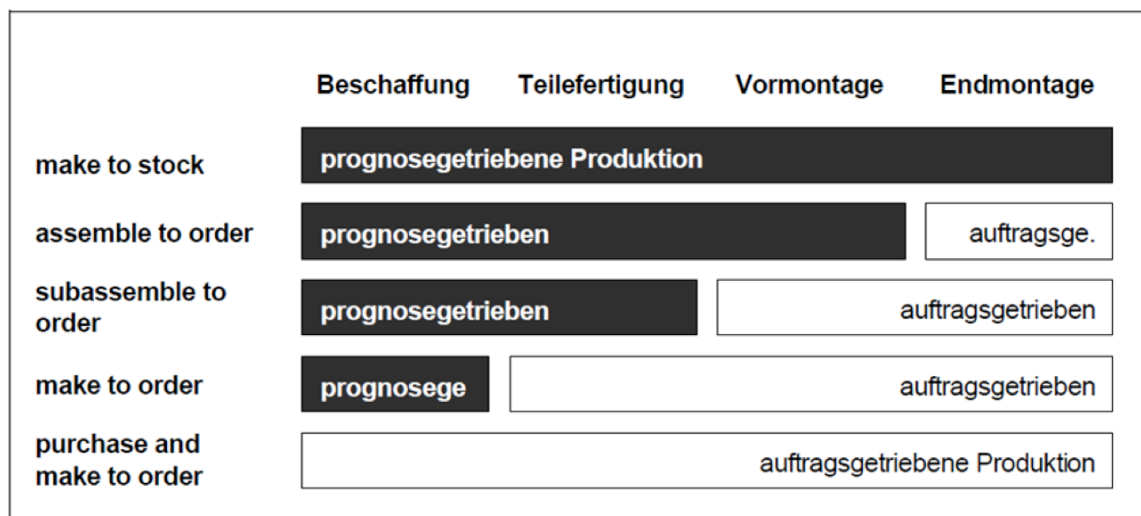


Es wird erwartet, dass sich durch POD z.B. der Ressourcenverbrauch durch Überproduktionen oder durch Lagerhaltung, wie sie in der klassischen Massenfertigung auftreten,

ten, reduzieren lässt. Hierin liegt auch die Motivation zur Durchführung dieser Studie begründet.

Ein prominentes Beispiel, welches immer wieder zur Darstellung von POD herangezogen wird, ist der Computerhersteller DELL. Hier beginnt die Endmontage der Computer erst, nachdem der Kunde seinen Rechner zumeist über das Internet konfiguriert hat.. Nach Abb. 85 handelt es sich somit um den Auftragsstyp „Assemble to order“. Die dazu notwendigen Bauteile und Baugruppen werden jedoch weiterhin prognosegetrieben produziert werden, so dass Ansätze zur Ressourceneinsparung in diesem Fall nicht voll zum Greifen kommen. Das Beispiel zeigt, wie schwierig es ist, Anwendungsfälle für die vollkommene Form des POD zu finden.

Abb. 85: Auftragsstypen mit verschiedenem Anteil auftragsgetriebener Elemente



22.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der Arbeit wurde zunächst analysiert, welche theoretischen Ansatzpunkte die Umstellung der klassischen Massenfertigung auf POD zur Ressourceneinsparung bietet. Anschließend wurden in einer breit angelegten Recherche Fallbeispiele identifiziert, in denen das Konzept des POD umgesetzt wurde oder die Möglichkeit gesehen wurde POD einzuführen und eine Quantifizierung des Ressourceneffizienzpotenzial mittels der MIPS-Methode sinnvoll erschien.

22.2.1 Ansatzpunkte zur Ressourceneinsparung durch POD

Um Ansatzpunkte zur Ressourceneinsparung zu identifizieren, wurden im Zuge der Studie die 7 Verschwendungsarten nach der Toyota-Philosophie untersucht (Brunner 2008). Es wurde analysiert, welchen Einfluss die Verschwendungsarten auf den Ressourcenverbrauch haben und welche Einsparpotenziale sich durch POD evtl. ergeben. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tab. 61 dargestellt.

Tab. 61: Verschwendungsarten in der Produktion

Verschwendungsarten	Beispiele	Einsparpotenziale durch POD
Überproduktion	Überproduktion durch fehlerhafte Absatzprognosen	Hoch
Hohe Bestände	Unzureichende Arbeitsplanung, Kommunikationsprobleme	Relativ hoch - Bestände von nicht verkauften Endprodukte werden reduziert
Komplexe Arbeitsprozesse	Lange Rüstzeiten, falsche Standards	Erhöhtes Risiko von gegenläufigen Effekten durch allgemeine Zunahme der Prozesskomplexität
Wartezeit	Maschinenstillstände oder gestörter Bearbeitungsfluss	Erhöhtes Risiko von gegenläufigen Effekten durch allgemeine Zunahme der Prozesskomplexität
Produktionsfehler	Unzureichende Sauberkeit und Ordnung, Produkte außerhalb der Spezifikation des Unternehmens	Erhöhtes Risiko von gegenläufigen Effekten durch allgemeine Zunahme der Prozesskomplexität
Überflüssige Bewegungen	Geringe Automatisierung, Suche nach Material oder Teilen	Erhöhtes Risiko von gegenläufigen Effekten durch allgemeine Zunahme der Prozesskomplexität
Transport	Lange Transportwege durch mangelhaftes Lagermanagement	Erhöhtes Risiko von gegenläufigen Effekten durch allgemeine Zunahme der Prozesskomplexität

Quelle: Eigene Darstellung

Da lediglich produziert wird, was auch beauftragt wurde, lässt sich mit POD ein unnötiger Ressourcenverbrauch durch Überproduktion vermeiden. Die Einsparpotenziale sind entsprechend als hoch einzuordnen.

Die Annahme, dass durch POD weniger Lagerkapazitäten vorgehalten werden müssen, konnte aufgrund der Untersuchungen grundsätzlich nicht bestätigt werden. Sowohl das eingangs erwähnte Beispiel Dell als auch Beispiele aus der Automobilindustrie zeigen, dass sich zwar Ausgangslager reduzieren lassen, sich aufgrund der starken Marktposition der OEM (Original Equipment Manufacturer) die Zulieferer jedoch dazu gezwungen werden Bauteile und Baugruppen in ausreichendem Maße vorzuhalten, um den Zwängen der Just-in-time Forderungen nachkommen zu können. Ein weiterer Effekt ist, dass sich die Lager der Zulieferer hin zu den Produktionsstätten der Kunden verlagert haben.

Bei allen anderen Verschwendungsarten ist mit gegenteiligen Effekten bezüglich einer Ressourceneinsparung zu rechnen. Aufgrund höherer Komplexität und Variabilität in der Produktion kommt es zu vermehrten Wartezeiten, einer Vergrößerung von Rüstzeiten und zu überflüssigen Bewegungen wegen der zwangsläufig geringeren Automatisierung, was zu einer geringeren Auslastung führt. Eine unmittelbare Erhöhung des Ressourcenverbrauches geht davon nicht aus. Bezieht man jedoch den Energieverbrauch auf das produzierte Produkt, erhöht sich dadurch indirekt der Ressourcenverbrauch, da der Energiebedarf einer Produktionsstätte in Fertigungsstillständen wie dem Rüsten bis zu 60 % des Volllastbedarfs ausmachen kann.

Transporte in der Supply Chain werden, wie in den Beispielen dargestellt, im Falle von POD wenig berührt. Geht man davon aus, dass kundenindividuell angefertigte Produkte auch individuelle Vertriebs- und Versandwege nach sich ziehen, ist in diesem Bereich allerdings mit einem verstärkten Transportaufkommen zu rechnen. Auch Produktionsfehler, welche wiederum aufgrund der variantenreicheren Produktion verstärkt bei POD auftreten können, führen über Ausschuss tendenziell zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch.

Aufgrund der vorstehenden Überlegungen wurde im Rahmen der Fallstudien lediglich die Überproduktion weitergehend analysiert. Die beschriebenen gegenteiligen Effekte wurden dabei so weit wie möglich mit berücksichtigt und hinterfragt.

22.2.2 Recherche von Fallbeispielen

Die Gewinnung der Daten zu Überproduktion, die für eine Potenzialanalyse nötig ist, gestaltete sich schwierig. Es stellte sich heraus, dass Unternehmen nur sehr begrenzt Angaben zu Überproduktion machen. Darüber hinaus hat die Analyse ergeben, dass nicht in allen Bereichen, in denen mit einer Überproduktion gerechnet wurde, diese auch zu identifizieren war. Aufgrund eingangs erwähnter Problematik, dass Beispiele vollkommener POD selten existieren und aufgrund der Tatsache, dass Überproduktion als Hauptansatzpunkt identifiziert wurde, wurde die Suche nach Fallbeispielen ausgeweitet. Mit einbezogen wurden auch Beispiele, in denen Überproduktion vorkommt, es sich aber nicht zwangsweise um Groß- oder Massenhersteller handeln musste.

Tab. 62: Auszug der durchgeführten Untersuchungen zur Überproduktion

Fallstudie	Quelle	Ergebnis
Kantinenessen	<ul style="list-style-type: none"> • Mensa Lichtwiese Darmstadt • Mensa Stuttgart 	Wenig Überschuss; Daten werden nicht erfasst; Bioabfälle enthalten Knochen, Verarbeitungsabfälle und von Studenten übriggelassenes Essen, d.h. keine Abschätzung möglich.
Textilindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Textilwirtschaft online • Trigema • Verband Nordwestdeutscher Textil- und Bekleidungs-industrie 	Textilhersteller in Deutschland haben keine Überproduktionen; hergestellt wird nur das, was vom Handel bestellt wird; im Handel nicht abgesetzte Ware wird im Outlet vertrieben; weitere Daten zu nicht verkaufter Ware werden nicht herausgegeben oder veröffentlicht.
Möbelindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • blaha 	Absage. Grund: Blaha bietet unter dem Namen „Forum.21“ Seminare für ihre Strategie an, daher keine Informationsausgabe.
Schuhhersteller	<ul style="list-style-type: none"> • www.selve.net 	Grundsätzliche Absage, jedoch mit Hinweis auf Literatur zum Geschäftsmodell.
Zeitschriften-industrie	<ul style="list-style-type: none"> • Klettverlag • Focus • Der Spiegel • www.bod.de 	Keine eigenen Angaben zu Überproduktionen von den Verlagen Hinweis auf Angaben zu Remittenden auf www.pz-online.de

Quelle: Eigene Darstellung

Darüber hinaus haben weitere Expertenbefragungen zum Thema bestätigt, dass nicht nur die im Rahmen dieser Studie analysierten Branchen und befragten Unternehmen nur wenige Angaben zu Überproduktionen machen, sondern auch darüber hinaus Informationen kaum verfügbar sind.

Tab. 63: Ergebnisse der Expertenbefragung

Institution	Ansprechpartner	Ergebnis
Uni Stuttgart	IKTD, Unternehmensberater u.a. für Produktion bei Krehl&Partner – Dr. Traub BWL Institut, Abteilung Organisation, Spezialgebiet: Prozess-orientiertes Management in der Automobilindustrie - Prof. Waldruff	Daten zu Überproduktionen nur schlecht verfügbar
RWTH Aachen/ Massachusetts Institute of Technology (MIT)	Experte für Mass Customization – Prof. Piller	Daten zu Überproduktionen nur schlecht verfügbar

Quelle: Eigene Darstellung

Ein wichtiger Bereich, in dem Angaben zu Überproduktion verfügbar waren und die Überproduktion auch keinen weiteren Abnehmer gefunden hat, sind Printmedien und hier stellvertretend die Zeitschriftenindustrie. Entsprechend wurden für dieses Fallbeispiel Ressourceneinsparpotenziale quantifiziert.

22.2.3 Definition der Service-Einheit im Fallbeispiel Zeitschriftenindustrie

In der Arbeit wird der Materialinput (t) auf 1.000.000 gedruckte Exemplare bezogen.

22.2.4 Analyserahmen und zentrale Annahmen

Für die Analyse wurden folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- Gewicht einer Zeitschrift: 300g (Der Spiegel)
- Anzahl der Seiten pro Zeitschrift: 200
- Als Grundstoff für das Zeitschriftenpapier wurde gebleichtes Papier nach der MIT-Tabelle angenommen.
- Distributionstransporte wurden berücksichtigt.
- Für den Druck der Zeitschriften wurden der Energieverbrauch und der Verbrauch an Alkohol mitberücksichtigt. Die MIPS von Alkohol wurde mit den MIT-Werten von Methanol berechnet.
- Druckfarbe wurde nicht berücksichtigt.
- Ressourceneinsparpotenziale wurden für eine angenommene Verringerung der Remissionsrate von 50% berechnet.

22.2.5 Datenerfassung

Der Verband der deutschen Zeitschriftenverleger veröffentlicht Daten zu Druckauflagen und Remissionen von insgesamt 50 Titeln (Gesamtdruckauflage: ca. 198 Mio. im Jahr), die als Grundlage für die durchzuführenden Berechnungen genutzt werden konnten.

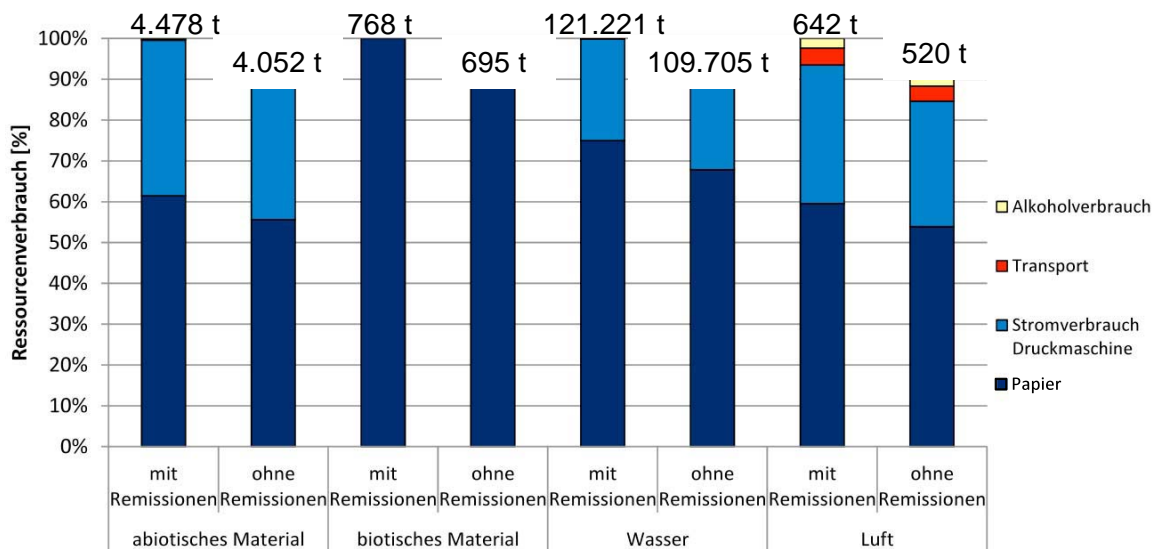
Die Berechnungen ergaben eine Gesamtremissionsrate dieser Titel von 24 %. Anschließend wurde eine Expertenbefragung zur Absicherung der Ergebnisse durchgeführt, bei der dieser Wert bestätigt wurde. Weiterhin konnte durch die Befragung festgestellt werden, dass der größte Anteil der Remissionen letztendlich entsorgt und nur ein sehr kleiner geschätzter Anteil von ca. 5% der Remissionen für Nachbestellungen, Eigenbedarf etc. eingelagert wird. Der Energieverbrauch für das Drucken der Zeitschriften wurde dem Umweltbericht eines Druckmaschinenherstellers entnommen (Manroland 2008). Die Angaben zum Alkoholverbrauch stammen von der Heidelberger Druckmaschinen AG (Heidelberger 2009). Der Transport wurde aufgrund von Angaben der Stiftung Warentest zum Dieselverbrauch, der durch die Distribution der test-Hefte entsteht, berücksichtigt (Stiftung 2009).

22.3 Ergebnisse der Analyse

Unter Einbezug der ermittelten Ergebnisse wurde die Materialintensität pro Serviceeinheit entsprechend der genannten funktionellen Einheit für die Bereitstellung von Zeitschriften berechnet.

Nachfolgend ist in der Abbildung der Ressourcenverbrauch bei der Zeitschriftenherstellung von 1.000.000 Exemplaren mit und ohne Remissionen dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass der Papierverbrauch den größten Anteil in den Kategorien hat. Daneben hat der Energieverbrauch beim Drucken noch einen signifikanten Einfluss. Der Alkoholverbrauch und die Transporte haben lediglich im Bereich Luft einen geringen Anteil am Ressourcenverbrauch. Einsparpotenziale bei Vermeidung von Remissionen ergeben sich in allen Kategorien zu 9,5 %, was sich durch Verringerung des Remissionsanteils um 50 % von 19 auf 9,5 % ergibt.

Abb. 86: Ressourcenverbrauch bei 1 Mio. Zeitschriften mit und ohne Remissionen



Quelle: Eigene Darstellung

Rechnet man das Ressourceneffizienzpotenzial auf die gesamte deutsche Zeitschriftenindustrie hoch ergeben sich entsprechend höhere absolute Einsparungen. Bei geschätzten 2,7 Mrd. (ca. 810.000 t) gedruckten deutschen Titeln pro Jahr, lässt sich ein Einsparpotenzial von mehr als 540 Mio. Exemplaren (>162.000 t) identifizieren. Beim abiotischen Material ergeben sich damit Einsparpotenziale von 1,14, beim biotischen Material von 0,2, bei Wasser von 31 und bei Luft 0,16 Mio. Tonnen. Bedenkt man nun, dass man durch POD zusätzlich die Einlagerung, die Zustellung als auch den Recyclingvorgang einsparen könnte, ergibt sich ein noch größeres Einsparpotenzial.

22.4 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlungen

Dass durch eine Verringerung von Überproduktion mittels POD Ressourcen eingespart werden können, steht außer Frage. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass zum einen Angaben zu Überproduktion nur spärlich vorhanden sind und dass zum anderen Überproduktion häufig über sekundäre Vertriebswege veräußert wird, so dass eine Ressourcenverschwendung nicht stattfindet. Aufgrund der schwierigen Datenlage konnte lediglich an einem Fallbeispiel eine Quantifizierung vorgenommen werden.

In dem untersuchten Bereich „Magazine-on-demand“ werden heute bereits eine Vielzahl an Inhalten elektronisch via Internet bereitgestellt, was in der Vergangenheit sicherlich zu einer Verringerung der Druckauflagen und damit auch zu einer Verringerung der Remissionen beigetragen hat. Durch das stetig wachsende Angebot via Internet ist auch eine weitere Verringerung der Überproduktion von Zeitschriften zu erwarten. Neben dem klassischen Abonnement konnte ein Anbieter, der Zeitschriften on-demand ausdruckt und dem Kunden bereitstellt, identifiziert werden. Dabei handelt es sich um das englische Start-up Unternehmen Mac Cloud. Das Unternehmen bietet die Möglichkeit eigne Zeitschriften zu Layouten und übernimmt den Druck. Dabei wird

nur dann etwas gedruckt, wenn auch Bestellungen vorliegen. Pro Seite kostet der Druck 20 US-Cent, wobei der Verkaufspreis vom Publisher selber festgelegt wird. Das Beispiel zeigt, dass Print-on-demand auch Bereich der Zeitschriften Anwendung finden kann, wobei dieses Geschäftsmodell sicherlich nur in Nischen bei kleinen Druckauflagen Anwendung finden kann.

Tab. 64: Zusammenfassende Bewertung des Fallbeispiels „Zeitschriftenindustrie“ nach den in Rohn et al. (2009) festgelegten qualitativen Kriterien

Kriterium	Zeitschriften „on demand“
Ressourceneinsatz	hoch
Ressourceneffizienzpotenzial	hoch - Remissionen können deutlich verringert werden und somit auch Einsparungen durch vermiedene Transport und Recyclingprozesse erreicht werden.
Sonstige Umweltauswirkungen	Wurden nicht explizit untersucht. Kritisch könnten lokale Druckemissionen an den Verkaufsstellen sein. Mögliche Rebound-Effekte könnten im elektronischen Bereich durch die Nutzung von Computerhardware und die Nutzung des Internets entstehen.
Realisierbarkeit	Print-on-demand in den Bereichen Bücher und Zeitungen bereits existent. Zeitschriften on-demand zu drucken steht sicherlich der hohe Aufwand durch hohe Seitenzahlen und meist hohe Farbintensität entgegen. Die Marktfähigkeit ist auch sicherlich abhängig von der Kundenakzeptanz. Realisierbarkeit im elektronischen Bereich ist bereits durch zahlreiche Umsetzungen bewiesen.
Wirtschaftliche Bedeutung	Hoch, da durch attraktive Angebote Umsatzsteigerungen und Kosteneinsparungen in der Zeitschriftenbranche zu erzielen sind.
Kommunizierbarkeit	Die Kommunizierbarkeit steht einer weiteren Verbreitung nicht entgegen.
Übertragbarkeit	Im Bereich „Books-on-demand“ und „Newspaper on demand“ ist die Entwicklung bereits weiter vorangeschritten. Bücher und Zeitungen werden elektronisch angeboten und auch bereits on-demand gedruckt und den Kunden zur Verfügung gestellt.

Quelle: Eigene Darstellung

Im Bereich „Newspaper-on-demand“ oder „Book-on-demand“ ist die Entwicklung bereits weiter vorangeschritten. Bücher werden seit bereits 15 Jahren bei Kleinstauflagen und Nachdrucken auf Bestellung nachgedruckt. Darüber hinaus werden international 25 Druckmaschinen (Espresso Book Machine) genutzt, mit der sich beim Buchhändler Bücher auf Nachfrage ausdrucken lassen. Elektronisch werden Bücher auch in einer immer größeren Anzahl von z.B. Amazon, Google oder Apple angeboten. Ähnliches ist für den Zeitungsbereich festzustellen. In Deutschland existieren vereinzelt Druckerterminals, an denen sich die gewünschten Zeitschriften ausdrucken lassen. Einer weiteren Verbreitung stehen derzeit noch Wartezeiten von ca. 15 Minuten und hohe Kosten entgegen. Darüber hinaus existieren Anbieter wie Newspaperdirect.com, Your Mail GmbH oder Pod Holding GmbH, die Zeitungen auf Anfrage im Land des Kunden drucken und ausliefern.

Die genannten Ansätze tragen alle zu einer Verringerung von Druckauflagen und somit zur Verringerung von Remissionen bei. Bei elektronisch angebotenen Produkten steht eine Analyse möglicher Rebound-Effekte, verursacht durch den Strombedarf oder die

Herstellung von Lesegeräten sowie die Nutzung des Internets, noch aus. Im Bereich gedruckter Produkte greifen die zugrundeliegenden Geschäftsmodelle vor allem in Nischen und bei kleineren Auflagen. Inwieweit eine Übertragung auf größere Auflagen möglich ist, lässt sich an dieser Stelle nur schwer beurteilen.

Inwieweit eine genauere Untersuchung von Überproduktion in den anderen genannten Bereichen sinnvoll ist, lässt sich nur schwer abschätzen. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass durch zukünftige innovative Technologien eine flexiblere Bearbeitung von Materialien möglich sein und das Prinzip des POD weiter Verbreitung finden wird. Dazu trägt sicherlich auch das Internet bei, da es eine einfachere Interaktion zwischen Kunden und Anbieter erlaubt, die vor einigen Jahren in der Form noch nicht möglich war. Hauptsächlich sollten jedoch Produkte, die traditionell durch viele Produktneuheiten und hohe Variantenvielzahl gekennzeichnet sind, in Verbindung mit POD untersucht werden. Maßgefertigte Produkte, „High-Interest-Güter“ und Produkte mit hohem Informationsgehalt sind dafür besonders geeignet und erreichen auch beim Konsumenten eine hohe Akzeptanz. Entsprechend ist eine weitergehende Untersuchung, inwieweit sich durch POD auch in anderen Bereichen Überproduktion verringern lässt zu empfehlen. Der Erfolg solcher Analysen steht und fällt jedoch mit der vorhandenen Datengrundlage und mit der Auskunftsbereitschaft der jeweiligen Akteure. Im Rahmen der vorliegenden Studienarbeit wurden Daten leider nicht im ausreichenden Maße erhalten.

22.5 Quellenverzeichnis

- Brunner, F.J. (2008): Japanische Erfolgskonzepte. Hanser Verlag, München, Wien.
- Kim, S. (2010): Ressourceneffizienzpotenzialen durch Production on demand. Studienarbeit, Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement, Universität Stuttgart
- Kirn, S.; Piller, F.; Reichwald, R.; Schenk, M.; Seelmann-Eggebert, R. (2005): Kundenzentrierte Wertschöpfung mit Mass Customization. Fraunhofer IRB Verlag, Passau
- Manroland AG (2008): manroland – EcoLogic.
- Rohn, H.; Lang-Koetz, C.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2009): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien - Ergebnisse eines kooperativen Auswahlprozesses, Ressourceneffizienz Paper 1.2, Wuppertal.
- Seydel, M. (2009): Lösungen für umweltfreundliches Drucken, Firmenpräsentation.
- Stiftung Warentest (2009): Umweltbericht.

23 Anhang

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht zu den beteiligten Personen und Institutionen an den vorliegenden Potenzialanalysen:

Kurztitel	Diplomand/-in	Betreuer/-in
"Ressourceneffizienzpotenzialen im Bereich der Abwasserfiltration"	Mathias Leck (Institut für Produktionstechnik und Logistik, Umweltgerechte Produkte und Prozesse – Universität Kassel)	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Bastian Lang (Institut für Produktionstechnik und Logistik, Umweltgerechte Produkte und Prozesse – Universität Kassel) Dr. Mark Junge (Limón GmbH)
"Ressourceneffiziente Energiespeicherung (Stromspeicher)"	Alain Heynen (RWTH Aachen, Studiengang Entsorgungswesen)	Eberhard Büttgen (Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft der RWTH Aachen)
"Ressourceneffiziente Energiespeicherung – (Wärmespeicher)"	Manuela Seitz (Universität Kassel)	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Bastian Lang (Institut für Produktionstechnik und Logistik, Umweltgerechte Produkte und Prozesse – Universität Kassel)
"Ressourceneffizienzpotenziale von Dämmstoffsystemen"	Christoph Schniering (RWTH Aachen)	(Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft der RWTH Aachen)
"Ressourceneffizienzpotenziale durch Windenergie und Biomasse in Deutschland"	Klaus Wiesen (HAWK Göttingen / Wuppertal Institut für Umwelt, Klima, Energie)	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Bastian Lang (Institut für Produktionstechnik und Logistik, Umweltgerechte Produkte und Prozesse – Universität Kassel) Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen (HAWK FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen Fakultät Ressourcenmanagement) Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)
"Ressourceneffizienzpotenziale durch Desertec"	Tobias Samus (Universität Kassel / Wuppertal Institut für Umwelt, Klima, Energie)	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Bastian Lang (Institut für Produktionstechnik und Logistik, Umweltgerechte Produkte und Prozesse – Universität Kassel) Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)
"Ressourceneffizienzpotenziale durch Photovoltaik"	Anna Cholewa (RWTH Aachen, Studiengang Entsorgungswesen)	Eberhard Büttgen (Lehr- und Forschungsgebiet Abfallwirtschaft der RWTH Aachen)
"Ressourceneffizienzkriterien beim Design (Beispiel Mobiltelefon)"	Verena Simon (Universität Duisburg-Essen, Industriedesign)	Prof. Anke Bernotat (Folkwang Universität, Industriedesign) Michael Lettenmeier (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)
"Green IT: Ressourceneffizienzpotenziale von Server Based Computing"	Daniel Maga (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)	Volker Knappertsbusch (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT) Markus Hiebel (Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT)

"Green IT: Ressourceneffizienzsteigerung bei IKT"	Katrin Werner (Universität Kassel)	Dr. Sylvie Geisendorf (Universität Kassel / FB Umwelt- und Verhaltensökonomik) Bastian Lang (Universität Kassel / Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse)
"Ressourceneffizienzpotenziale beim Recycling"	Jan Udes (Leuphana Universität Lüneburg)	Martin Grismajer (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb – TU Berlin) Steffen Heyer (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb – TU Berlin)
"Ressourceneffizienzpotenziale in der Lebensmittelproduktion – Beispiel Fisch"	Melanie Lukas (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)	Prof. Dr. rer. pol. Petra Teitscheid (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie) Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)
"Ressourceneffizienzpotenziale in der Lebensmittelproduktion – Beispiel Obst"	Lene Stöwer (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)	Prof. Dr. rer. pol. Petra Teitscheid (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie) Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)
"Ressourceneffizienzpotenziale in der Lebensmittelproduktion – Beispiel Gemüse"	Almuth Eberhard (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie)	Prof. Dr. rer. pol. Petra Teitscheid (Fachhochschule Münster, Fachbereich Oecotrophologie) Holger Rohn (Trifolium – Beratungsgesellschaft mbH)
"Ressourceneffizienzpotenziale der Intelligenten Landtechnik"	Lisa Schimanski (TU München)	Prof. Dr. agr. habil. Heinz Bernhardt (Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik – TU München) Markus Heckmann (Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, TU München) Martin Grismajer (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb – TU Berlin)
"Ermittlung von Ressourceneinsparpotenzialen im Güterverkehr"	Cengizhan Aydin (Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement, Universität Stuttgart)	Benjamin Kuhrke (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen - TU Darmstadt) Michael Lettenmeier (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie)
"Ressourceneffizienz durch Elektrofahrzeuge"	Björn Reichardt (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h W. Hufenbach, Robert Kupfer, Peter Lucas (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)

"Beachtung von Ressourceneffizienzkriterien beim Design"	Peter Lucas (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h W. Hufenbach, Robert Kupfer (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)
"Ressourceneffizienz durch Leichtbau"	Sebastian Rothenberg (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h W. Hufenbach, Robert Kupfer, Peter Lucas (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden)
"Ressourceneffizienzpotenziale höher- und höchstfester Stähle"	Masih Sadeghi (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen - TU Darmstadt)	Benjamin Kuhrke (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen - TU Darmstadt)
Ressourceneffizienzpotenziale durch „Nutzen statt Besitzen“	Piotr Pacholak (Technische Universität Berlin)	Martin Grismajer (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb – TU Berlin) Timo Fleschutz (Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb / Fachgebiet Montagetechnik und Fabrikbetrieb - TU Berlin)
Ressourceneffizienzpotenziale durch "Production on demand"	Simon Kim (Universität Stuttgart / Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement)	Benjamin Kuhrke (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen - TU Darmstadt)