

Cascade Use



CASCADE USE

**Kaskadennutzung zum nachhaltigen
Ressourcenmanagement**

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

Schlussbericht

der Nachwuchsforschergruppe Cascade Use – Beitrag von Kaskadennutzung von Materialien zum nachhaltigen Ressourcenmanagement

Zuwendungsempfänger: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg	Förderkennzeichen: 01LN1310A
Vorhabenbezeichnung: Cascade Use - Beitrag von Kaskadennutzung von Materialien zum nachhaltigen Ressourcenmanagement	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2014-30.09.2019	
Projektverantwortlich: Dr.-Ing. Alexandra Pehlken	

Autoren des Schlussberichtes:

Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp, Charlotte Schäffer

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

Gefördert im FONA Förderprogramm für Nachwuchsgruppen „Globaler Wandel 4+1“



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhalt

I.	Kurzdarstellung.....	5
1.	Aufgabenstellung.....	5
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	9
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	16
II.	Ausführliche Darstellung	18
1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	18
	Arbeitspaket 1: Entwicklung eines Informationsmodells für Automobilteile	18
	Meilenstein 1: Markt- und Verbraucheranalyse des Gebrauchtwagenmarktes.....	19
	Meilenstein 2: Clustern von Automobilteilen nach Rohstoffgehalt.....	21
	Arbeitspaket 2: Bewertung der Kaskadennutzung und weiteren Lebenszyklen.....	24
	Meilenstein 3: Ökologische Bewertung.....	31
	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines nachhaltigen Management Entscheidungstool	33
	Meilenstein 4: Entscheidungstool [RAUPE].....	36
	Meilenstein 5: Überprüfung des Entscheidungsinstrumentes und Visualisierung	38
	Besondere Ergebnisse und Leistungen.....	41
	Einsatz für die junge Generation	42
2.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	44
3.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	45
4.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	46
5.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	48
	Literaturverzeichnis.....	51

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die Nachwuchsforschergruppe Cascade Use unterstützt Anstrengungen gesellschaftlicher Akteure, langfristig weniger Ressourcen zu verbrauchen. Die Mitglieder der Gruppe haben ein Schlüsselinstrument zur Entscheidungsfindung entwickelt und erprobt. Die interdisziplinäre Arbeit konzentriert sich auf die beiden Kernfragen, wie Materialien in Lebenszyklen eingebunden sind bzw. wann sie wieder verfügbar werden, um sie entweder wiederzuverwenden oder weiterzuverwerten. Das Ziel dabei war, Ressourcen möglichst lange einer Nutzungsphase zuführen zu können, damit keine neuen Primärrohstoffe wie Stahl, Kupfer und insbesondere die kritischen Materialien wie beispielsweise Seltene Erden eingesetzt werden müssen. Mit der Gewinnung der Primärrohstoffe sind teilweise erhebliche Umweltbelastungen verbunden, die verringert werden können, indem Sekundärrohstoffe durch eine Kaskadennutzung langfristig in Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Nachdem vorrangig Produkte weiterverwendet werden, so werden sie anschließend durch Recycling weiterhin für andere Produkte zur Verwendung stehen, ohne Primärrohstoffe zu verwenden. Eine Ressourcenschonung genießt in diesem Projekt oberste Priorität. Für Behörden und Regierungsvertreter kann das hier entwickelte Entscheidungsinstrument dazu dienen, Technologien weiter zu fördern, bzw. zu untersagen, sofern eine rohstoffliche Nutzung im Vordergrund steht. Für andere Anwender kann das Tool ein Hilfsinstrument darstellen, um individuell festgelegte Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Das Entscheidungsinstrument basiert auf der Materialflussanalyse mit technologischem, ökologischem und ökonomischem Bezug, um die weitere Materialnutzung mit dem geringsten Umwelteinfluss zu identifizieren und zu bewerten. Dabei wurde eine Methode zur Einschätzung der lebenszyklusübergreifenden Materialverfügbarkeit genutzt. Das Fallbeispiel stellt die Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung von Altautoteilen in Deutschland und China dar. Anhand der errechneten ersparten CO₂-Emissionen innerhalb der Recyclinghierarchie kann der Kunde oder die Industrie selbst für sich bestimmen, welchen Beitrag sie zur Ressourcenschonung leisten können.

Die Nutzung des Entscheidungsinstruments erschloss sich im nachhaltigen Ressourcenmanagement auf dem Automobilrecycling- und Weiterverwendungsmarkt als Praxisfall. Hier erfolgten die abschließende Verifizierung, Evaluation und Implementation. Zusätzlich wurde eine mobile Anwendung entwickelt. Mit der Bewertung des Umwelteinflusses von jedem weiterverwendetem Autoteil im Vergleich mit der Neuherstellung kann in Zukunft jeder einzelne Käufer Einfluss auf ein nachhaltiges Wirtschaften mit Ressourcen nehmen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde als unabhängige Nachwuchsgruppe im FONA Förderprogramm unter der Fördermaßnahme „Nachwuchsgruppen Globaler Wandel 4+1“ gefördert. Vom 01.03.2014 bis 28.02.2018 wurde die Nachwuchsforschergruppe an der Carl von Ossietzky Universität in der Fakultät 2 Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften als eigenständige Forschergruppe etabliert und nach positiver Evaluierung bis zum 30.09.2019 verlängert. Cascade Use wurde geleitet von Dr.-Ing. Alexandra Pehlken und unterstützt von den Projektassistentinnen Charlotte Schäffer (bis 2018) und Anne Seela. Während der Laufzeit wurden insgesamt 3 Doktoranden eingestellt, von denen einer (Dr. Matthias Kalverkamp) noch während der Laufzeit von Cascade Use im Jahr 2018 mit Auszeichnung an der Carl von Ossietzky Universität promovierte. Extern finanzierte Doktoranden oder Postdocs kamen in Laufe der Jahre dazu. Eine enge Kooperation mit der Shanghai Jiao Tong University (Prof. Chen Ming) sollte zudem wertvolle Impulse auf inhaltlicher und Doktorandenebene liefern.

Die inhaltliche Arbeit der Forschergruppe zielt darauf ab, Rohstoffe möglichst lange im Wirtschaftskreislauf zu nutzen und so die Ressourcen sowie die Umwelt schonen und ökonomischen Potenziale zu erschließen.

Erst Autoreifen, im zweiten Leben vielleicht Dämmplatte oder Schuhsohle, und im dritten möglicherweise Bodenbelag – wird ein Rohstoff wie Rohöl, aus dem Autoreifen heute noch größtenteils bestehen, mehrfach und über mehrere Stufen genutzt, spricht man von „Kaskadennutzung“. Der Cascade Use Ansatz bezieht die Grenzen der Kaskadennutzung ein, da meist ein zu hoher Energieeintrag beim Recycling dem Wert eines wiedergewonnenen Materialstroms entgegensteht. Der Fokus liegt dabei hauptsächlich auf dem Automobilbereich.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Forschergruppe Cascade Use wurde für 4+1 Jahre geplant und beantragt. Durch Verlängerungsanträge und Umwidmungen im Laufe der Zeit hat sich die Planung des Vorhabens immer wieder geringfügig geändert. Die Meilensteine blieben dennoch unverändert.

		Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6
AP1 - Entwicklung eines Informationsmodells für gebrauchte Autoteile							
1.1. Fokus auf den Rohstoffbedarf							
1.1.1.	Fokus auf neue Technologien, wie Elektro- und Hybridfahrzeuge und deren Ressourcenbedarf						
1.1.2.	Marktanalyse von Elektro- und Hybridfahrzeuge						
1.1.3.	Anwendbarkeit spezieller Autoteile auf Rohstoffsubstitution und Recycling						
1.1.4.	Marktanalyse des Autorecyclings und Autoteileaufarbeitung						
1.2. Clustern							
1.2.1.	Clustern der Kriterien für Autoteile in Anlehnung an bestehende Richtlinien						
1.2.2.	Clustern der Kriterien für Autoteile in Anlehnung an den Rohstoffbedarf						
1.3. Potential Analyse							
1.3.1.	Potential der Rohstoffsubstitution und Vergleich des aktuellen und prospektiven Rohstoffbedarfes in VR China						
1.3.2.	Potential der Rohstoffsubstitution und Vergleich des aktuellen und prospektiven Rohstoffbedarfes in D						
AP2 - Bewertung der Kaskadennutzung und weiteren Lebenszyklen							
2.1. Technische Bewertung							
2.1.1.	Materialflussanalyse der identifizierten Sekundärrohstoffe						
2.1.2.	Analyse der Lebensdauer von ausgewählten Autoteilen						
2.1.3.	Prozesseffizienz mit einem Fokus auf Allokation und Unsicherheit der Rohstoffe						
2.2. Ressourcenbedarf, Dissipative Verluste und Datenunsicherheit							
2.2.1.	Ressourcenbedarf, Dissipative Verluste und Datenunsicherheit						
2.3. Ökologische und ökonomische Bewertung							
2.3.1.	Bewertung des Marktes und der Akzeptanz von Sekundärrohstoffen aus Altautos						
2.3.2.	Ökologische und ökonomische Bewertung der Wiederaufarbeitung, Weiternutzung und Recycling von Autoteilen						
2.3.3.	Bewertung / Identifizierung von ökonomischen und ökologischen Indikatoren für nachhaltige Prozesse						

Während AP1 sich ausschließlich der Informationen über gebrauchte Autoteile in Deutschland und der VR China widmete, so fokussierte AP2 die Methode der Kaskadennutzung. AP3 konzentrierte sich wesentlich auf die Entwicklung des Informationsmodells „RAUPE“, wobei Informationen aus AP1 und AP2 in das Modell von AP3 einfließen. Alle 5 Meilensteine wurden erfolgreich abgeschlossen.

		Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6
AP3 - Entwicklung eines nachhaltigen Management Entscheidungstool							
3.1. Modellentwicklung RAUPE							
3.1.1.	Evaluation der Rahmenbedingungen zum Aufbau des Autoteile-Informationsmodells						
3.1.2.	Entwicklung eines Anwender-orientierten Werkzeugs basierend auf Nachhaltigkeitsindikatoren für Autoteile						
3.1.3.	Dynamische Modellstruktur für die Bewertung von Recycling, Wiederverwendung und Aufarbeitungsoptionen					M4	
3.1.4.	Entwicklung von RAUPE zur Visualisierung der Recyclingoptionen und der ökologischen Bewertung						
3.1.5.	Test Phase und Evaluation des Entscheidungstools						M5
Evaluation							
	Bericht und Evaluation für 5. Jahr						

Meilenstein	
M1: Markt und Verbraucheranalyse des Autoteilegebrauchmarktes	M4: Entwicklung des Entscheidungstools RAUPE
M2: Clustern der Autoteile in Anlehnung an die Rohstoffanteile	M5: Evaluation und Visualisierung des Entscheidungstools RAUPE
M3: Ökologische Bewertung	

Nach der gemeinsam mit der Shanghai Jiao Tong University in 2017 in Shanghai durchgeführten Konferenz „**International Symposium on Cascade Use of Automotive Parts 2017**“ wurde im September 2018 die finale Abschlusskonferenz von Cascade Use „**ICCCE2018 - International Conference on Cascade Use and Circular Economy**“ in Oldenburg veranstaltet.

Die Beiträge sind noch auf der Homepage <https://www.iccce2018.com/> einsehbar.

Der Tagungsband der Konferenz wurde als Buch im Springer Verlag als „Cascade Use in Technologies“ veröffentlicht: <https://www.springer.com/de/book/9783662578858>



4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Das Automobil ist sehr gut erforscht und es gibt unzählige Arbeitsbereiche und Forschungsinstitute im Bereich des Maschinenbaus. Allerdings beziehen sich die meisten Forschungsarbeiten auf die Produktionsphase und das Engineering von Autos. Die Nutzungsphase ist für den Autohalter interessant, aber kaum einer interessiert sich für das „End-of-Life“, bzw. die Entsorgungsphase des Autos. Sehr wenige Menschen wissen, dass Autos zur Verwertung auch als „Ersatzteillager“ für gebrauchte Autos dienen können und dass dieser Markt aktuell in Deutschland besteht. Die Vorteile der verlängerten Nutzung von gebrauchten Autoteilen sind dabei sehr deutlich, wenn Rohstoffe im Fokus sind. Ist ein Rohstoff auf dem Markt einfach und kostengünstig zu erhalten, so geht der Trend eher dazu über ein Bauteil neu zu produzieren. Ist die Produktion mit höheren Materialkosten verbunden, so entwickeln sich schnell Rückholkonzepte oder ein Recycling der Rohstoffe. Ein Recycling der Rohstoffe ist sehr eng mit der Einsparung von CO₂-Emissionen verbunden, da der Bergbau von Primärrohstoffen sehr energieintensiv sein kann. Als viel zitiertes Beispiel sei hier Aluminium genannt, welches beim Recycling (als Sekundärgewinnung) 90% der Energieeinsparung im Vergleich zur Primärgewinnung erzielen kann.

Die Zusammensetzung eines modernen PKWs besteht aus vielen unterschiedlichen Materialien mit einer stetig wachsenden Komplexität. Diese Vielfalt ist auf die breiter werdende Anwendungspalette zurückzuführen, die ein Automobil in der heutigen Zeit abdecken muss, um den Komfort- und Sicherheitsansprüchen der Konsumenten gerecht zu werden [Schmid, 2010]. Abbildung 1 zeigt die Aufteilung der enthaltenen Materialien in Prozentangaben.

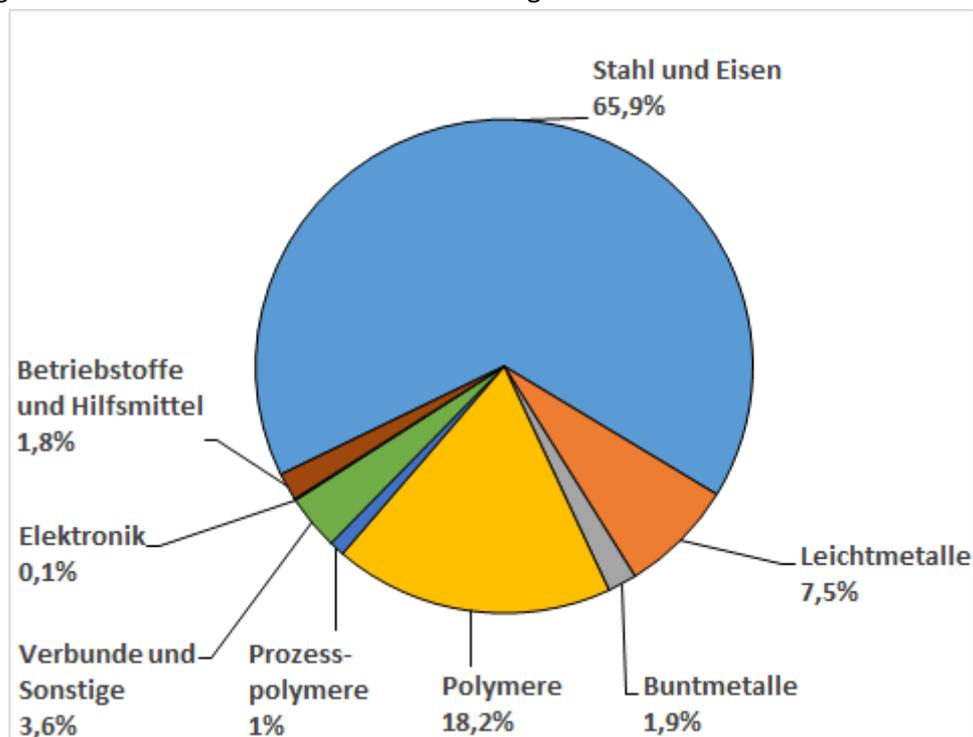


Abbildung 1: Anteile an Werkstoffen in Massenprozent des Golf VI Baujahr 2009 [Schmid, 2010]

Den größten Materialanteil nehmen die Stahl- und Eisenwerkstoffe mit knapp 2/3 der Masse ein. Bei einem Durchschnittsgewicht eines Mittelklassewagens von 1500 kg entspricht das 933 kg. In den Stählen sind Legierungselemente enthalten, die den Werkstoffen ihre leistungsfähigen Eigenschaften wie Zähigkeit, Festigkeit oder Härte verleihen. Die wichtigsten Legierungselemente dieser Stähle sind Mangan mit 0,8-2%, Silizium mit 0,1-2% und Aluminium mit bis zu 0,2% [Angerer, Erdmann et al, 2009]. Der Aluminiumanteil liegt bei 140-150 kg. Für die Verarbeitung an der Karosserie finden naturharte Aluminiumlegierungen mit den Legierungselementen Magnesium 4-5%, Mangan 0,2-0,5% Zink 0,25% und Silizium 0,2% Anwendung [European Aluminium Association, 2018]. Während die Trägermetalle wie Stahl oder Aluminium gut im Kreislauf zu führen sind, gehen die Legierungen im Recyclingprozess oft verloren, bzw. verunreinigen die Trägermetalle.

In den modernen Fahrzeugen nimmt der Einsatz von Elektronik stetig zu. Die Materialkosten der Autoelektronik belaufen sich auf ungefähr 30%, machen aber nur 4% des Gewichts aus, inklusive Leitungen und Elektromotoren. 0,1% davon machen Leiterplatten aus, in denen verschiedene Edelmetalle wie Silber, Gold und Platin enthalten sind [Schmid, zur Lage, 2014]. Auf Grund der edlen Eigenschaften befindet sich zusätzlich ein nicht unerhebliches Vorkommen von Metallen der Platingruppe in den Katalysatoren.

Es verstecken sich nicht nur Edelmetalle in der Autoelektronik, sondern auch kleine Mengen von den sogenannten Gewürzmetallen, die in verschwindend geringen Mengen in vielen Bauteilen des Autos verteilt sind. Auf Grund von unzureichenden Angaben ist es aber schwer den genauen Inhalt dieser Metalle zu bestimmen. Der Anteil in einem Hybridfahrzeug wird auf 20 kg geschätzt [Angerer, Erdmann et al, 2009] mit einem stetig ansteigenden Anteil in zukünftigen Fahrzeugen.

Die Ergebnisse aus der Forschung sollen generell helfen Strategien zu entwickeln, um die Kombination von Wieder-, bzw. Weiternutzung und werkstofflichem Recycling im Hinblick auf eine ressourceneffiziente Kaskadennutzung im Kreislauf zu erhalten. Die Nachhaltigkeit der Rohstoffversorgung wird damit insgesamt verbessert werden und gleichzeitig sollen CO₂-Emissionen reduziert werden. Unser Ansatz bezieht die Grenzen der Kaskadennutzung ein, da meist ein zu hoher Energieeintrag beim Recycling dem Wert eines wiedergewonnenen Materialstroms entgegensteht. Das Potential des nachhaltigen Ressourcenmanagements ist als sehr hoch anzusehen und Wiederverwendung hat unumstritten die beste Umweltrelevanz und verursacht die geringsten Emissionen. Bauteile unterscheiden sich dabei in a) Bauteile ohne Wiederaufarbeitung und b) aufgearbeitete Bauteile (remanufactured). In beiden Fällen wird der Eintrag neuer Ressourcen stark minimiert und strategische Ressourcen bleiben länger im Kreislauf erhalten. Recyclingbauteile, die weder unter a) noch b) fallen, werden werkstofflich verwendet und gelangen in neue Produkte, in Fällen von heizwertreichen Fraktionen auch energetisch.

Ein weiterer, ebenso bedeutsamer Aspekt ist die Gesetzgebung im Recycling: Die zunehmende Rohstoffvielfalt im Auto und die Recyclingziele führen zu immer anspruchsvolleren Recyclingtechnologien. So sieht z.B. die ELV Directive der EU seit dem Jahr 2015 eine Recyclingquote von 95% (bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeuggewicht) für Altfahrzeuge vor; das bedeutet

zwingend, dass unter Berücksichtigung alternativer Antriebstechnologien neue Recyclingtechnologien zu entwickeln sind, bzw. bestehende unter Umständen verbessert werden [ELV Directive, 2000]. In Deutschland werden die Quoten bisher eingehalten, allerdings wird der Druck auf heizwertreiche Materialien größer, da der Anteil der energetischen Verwertung sinkt, wie. z.B. Altreifen.

Kaskadennutzungen aus dem Automobil sind weniger bekannt, da ein großer Teil des Autos in den Schredder gelangt und anschließend oft metallurgisch verwertet wird. Auf diesem Wege kann das "Produkt" nicht weiterverfolgt werden, da es in der Schmelze mit anderen "Produkten" vermischt ist. Somit wird nicht unterschieden zwischen Autobauteilen und beispielsweise Computerbauteilen aus dem Recycling. Bei einer werkstofflichen Kaskadennutzung wird das Recycling-Bauteil separiert und getrennt aufbereitet¹.

Aufgrund der oben genannten gesetzlichen Änderungen der energetisch zu verwertenden Fraktion wird hier das Beispiel der Altreifen vorgestellt. Die Studien-Gesellschaft für Altgummi-Verwertungssysteme (GAVS) des Wirtschaftsverbandes der deutschen Kautschukindustrie e.V. erfasste im Jahr 2013 ein Altreifenaufkommen von 582.000 t. Demzufolge bleibt der Abfallstrom im Vergleich zum Vorjahr fast unverändert [Hirsch, 2014]. Aufgrund des hinter den Jahren 2011 zurückbleibenden Altreifenaufkommens sank die Ausfuhr von Gebrauchtreifen im Jahr 2013 um rund 10%, was dafür spricht, dass der „inländische Verwertungsmarkt über ausreichende Kapazitäten verfügt, um alle Altreifen zu verwerten“ [Hirsch, 2014]. Des Weiteren greift die Verwertungsbranche auf Importe von zerkleinerten Altreifen und Gummiabfällen zurück.

Durch die steigende Anzahl der zugelassenen Personenkraftwagen ist ein Anstieg der Alt- und Gebrauchtwagenreifen in den kommenden Jahren zu erwarten. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch Weiterentwicklungen in der Reifentechnik eine deutlich längere Reifen-Nutzungsdauer erreicht werden kann. Abbildung 2 zeigt die Verteilung im Jahr 2013 nach der jährlichen Erfassung der GAVS in einem Sankey-Diagramm. Den größten Anteil an der Altreifenverwertung macht die thermische Verwertung in der Zementindustrie aus [EUWID, 2014]. Eine Ökobilanz-Studie der Firma Genan hat aufgezeigt, dass die Mitverbrennung von Altreifen in Zementwerken der stofflichen Verwertung unterzuordnen ist [Bakas et al., 2009]. Aus Sicht der Kaskadennutzung ist eine höhere Verwertungsquote von Altreifen zu Granulaten und Gummimehl in den Folgejahren zu erhoffen.

¹ Vgl. Pehlken; Kalverkamp 2015: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR8/2015_RuR_173-182_Pehlken.pdf

Verwertung und Wiederverwendung von Altreifen (Deutschland, 2013)

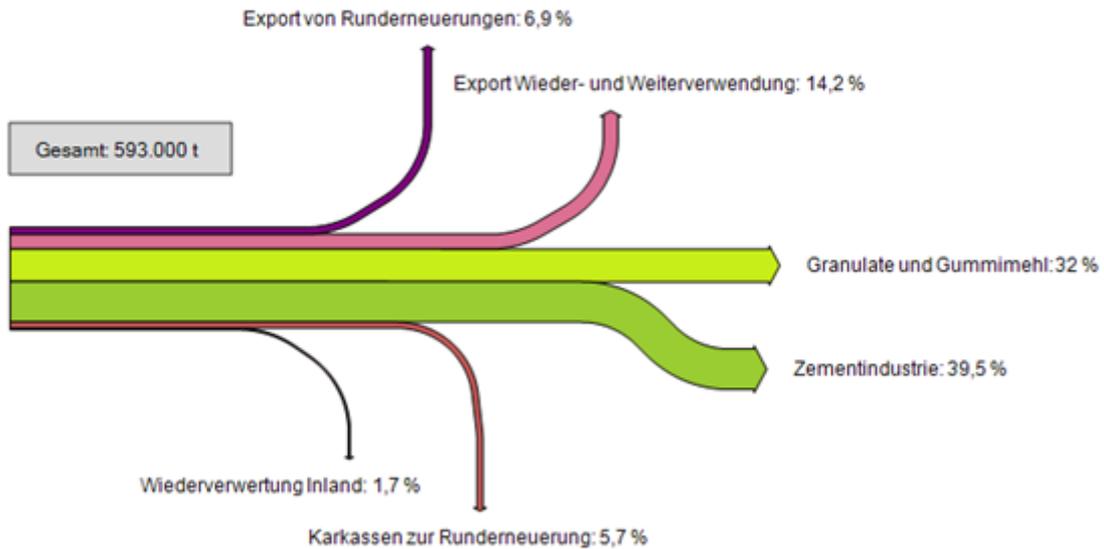
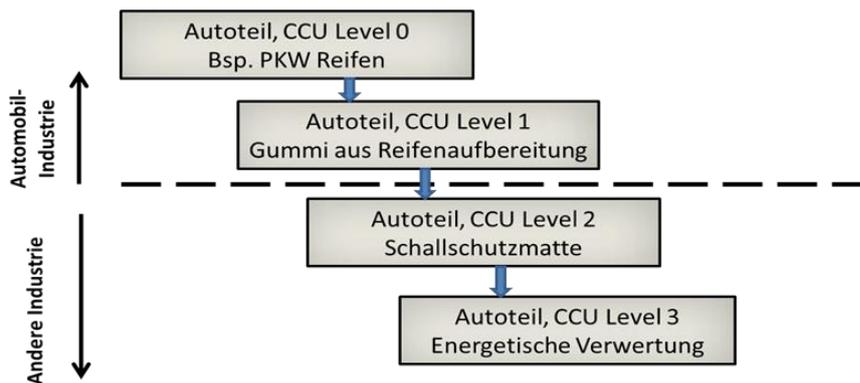


Abbildung 2: Verwertung und Wiederverwendung von Altreifen im Jahr 2013 (nach GAVS-Statistik)

Granulate und Gummimehle aus der mechanischen Altreifenaufbereitung zeigen bereits eine gute Anwendbarkeit aus werkstofflicher Sicht. Sie werden als Zuschlagstoffe in der Industrie, Chemie, Bau, Freizeit und dem Sport eingesetzt, wie beispielsweise als Kunstrasen, auf Spielplätzen, als Fallschutzbeläge, in Schuhsohlen oder wer kennt sie nicht: die Schaukel aus Altreifen. Recyclinggummi wird (bis auf Produktionsabfall) kaum wieder in der Reifenbranche in Neureifen eingesetzt, da die Einhaltung der Qualität aufgrund der verschiedenen Reifenmarken sehr unsicher ist.



CCU Level X = Cascade Use level des Produktes

Abbildung 3 Kaskadennutzung eines Bauteils (hier: Altreifen)

Die Abbildung 3 zeigt eine mögliche Kaskadennutzung von Altreifen, an deren Ende aufgrund des hohen Heizwertes die energetische Nutzung (meist in Zementwerken) steht. Auch ohne ökobilanzielle Berechnungen ist es offensichtlich, dass hier leicht Ressourcen in Form von Energie und Material eingespart werden können und CO₂ Emissionen reduziert werden.

Circular Economy: Wiederverwendung und -Verwertung

Durch die Betrachtung der Kreislaufführung von Rohstoffen in Autos, gelangt man schnell bei der Circular Economy Strategie, die gleich zu Beginn der Laufzeit von Cascade Use veröffentlicht wurde. Die „Circular Economy Strategie“ der Europäischen Kommission [EC 2015a] hat das Bewusstsein für eine nachhaltige Ressourcennutzung in der Wirtschaft und Gesellschaft weiter geschärft. Politische Maßnahmen zielen darauf ab, die Umweltauswirkungen von Altprodukten zu verringern [EU 2000] oder negative Einflüsse zu reduzieren, z.B. beim Handel mit Konfliktmineralien [Dodd-Frank Act 2010]. Die EU hat Gesetze und Verordnungen erlassen, um die Kreislaufwirtschaft Europaweit zu stärken mit dem Ziel, durch Ressourceneffizienz Produkt- und Materialwerte möglichst lange zu bewahren [EC 2015a]. Ausgewählte Vorschriften gelten insbesondere für Altfahrzeuge (im Englischen End-of-Life Vehicles, ELVs) [EC 2015b; EU 2000, 2008]. Die EU verweist auf das Modell der Abfallhierarchie, um ihre Präferenzen in Bezug auf die Abfallbehandlung darzulegen [EC 2015a]. In Bezug auf Produkte am Ende ihres Lebenszyklus konzentriert sich die Abfallhierarchie auf die Wiederverwendung und das Recycling als bevorzugte Strategien gegenüber der Verwertung bzw. den Deponien. Die Wiederverwendung umfasst Strategien, die die Lebensdauer von Produkten oder Komponenten verlängern. Recycling ist der Prozess der Rückgewinnung von Materialien aus Abfällen. Unter Verwertung versteht man hier die energetische Verwertung, d.h. die Abfallverbrennung [EC 2015a]. Deponierung ist unvermeidlich, sollte aber so weit wie möglich vermieden werden [EU 2008].

Remanufacturing

Das Remanufacturing beinhaltet die Wiederverwendung von gebrauchten Autoteilen mit Hilfe der technischen Überarbeitung der Bauteile, so dass ein Neuteil-ähnlicher Zustand hergestellt wird. Die Wiederverwendung von Altprodukten ist sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht aufgrund der bereits erfolgten Wertschöpfung und der dadurch im Produkt gebundenen Rohstoffe, Arbeit, Zeit oder Energie einer Neuproduktion vorzuziehen [Agrawal, Atasu und van Ittersum 2012; Barnes 1982]. Die Wiederverwendung umfasst verschiedene Strategien, z.B. die direkte Wiederverwendung von Fahrzeugkomponenten als Ersatzteile oder als Ressource für die Wiederaufarbeitung, dem sog. Remanufacturing/der Refabrikation [Thierry et al. 1995]. Das Remanufacturing von Altprodukten ist im Regelfall in der Lage, mehr von der bereits erfolgten Wertschöpfung und der gebundenen Ressourcen zu erhalten als das stoffliche Recycling [Östlin, Sundin und Björkman 2009]. Das Remanufacturing von gebrauchten Produkten umfasst einen Herstellungsprozess, der darauf abzielt, Produkte oder Komponenten mit den gleichen Spezifikationen wie das entsprechende Neuprodukt/die Neukomponente wiederherzustellen [APRA Europe 2014].

Closed-Loop Supply Chains

In Produktionssystemen werden Material- oder Produktströme i.d.R. als vorwärtsgerichtet dargestellt: hin zum Endkunden. Rückflüsse in Supply Chains werden meist als gegenläufig dargestellt, die Produkte



einschließlich der Rückmeldung von Informationen vom Kunden zurück zum OEM transportieren für Garantie, Reparatur, Entsorgung und Recycling [Guide et al., 2003; Östlin et al., 2008]. Reverse Supply Chains („umgekehrte Lieferketten“) sind ein zentrales Konzept in der Nachhaltigkeitsbetrachtung von Supply Chains. Der Closed-Loop Supply Chain (CLSC)-Ansatz ergänzt das sogenannte Sustainable Supply Chain Management [Seuring und Müller, 2008] durch die Betrachtung „umgekehrter“ Lieferketten [Brandenburg et al., 2014; Seuring, 2013]. CLSCs bieten Chancen für wirtschaftlichen und gleichzeitig ökologischen Nutzen [Difrancesco und Huchzermeier, 2015; Guide und van Wassenhove, 2009]. Dennoch konzentrieren sich die CLSC-Modelle hauptsächlich auf die Finanzoptimierung, was die gängige Annahme in Frage stellt, dass CLSCs "per Definition" nachhaltig sind [Quariguasi Frota Neto et al., 2010].

Eine CLSC ist allgemein definiert als *“the design, control, and operation of a system to maximize value creation over the entire life cycle of a product with dynamic recovery of value from different types and volumes of returns over time”* [Guide und van Wassenhove, 2009: 10]. Im Allgemeinen betrachten CLSCs im Sinne eines Kreislaufs solche „loops“ (Schleifen), die einen Waren- und Informationsfluss auf ein bestimmtes Unternehmen ausrichten, in der Regel in einem vom Hersteller (OEM) dominierten Supply Chain-Netzwerk. CLSCs sind jedoch komplexe Systeme, die auf Supply Chain Aktivitäten abzielen, die wiederum den Rückfluss besser steuerbar machen. Dabei können eine Vielzahl unabhängiger Akteure beteiligt sein, wie z.B. die Großhändler, Einzelhändler, Distributoren oder sogar Endkunden. Die Fähigkeit eines einzigen Akteurs, die gesamte CLSC tatsächlich zu "kontrollieren", ist jedoch begrenzt [Guide und van Wassenhove, 2009]. Der Begriff CLSC wird außerdem verwendet, um „loops“ zu beschreiben, in denen Dritte auf zurückgegebene oder entsorgte Produkte oder Komponenten für ihre eigenen wirtschaftlichen Aktivitäten zurückgreifen [Majumder und Groenevelt, 2001]. Insbesondere beim Remanufacturing machen sich unabhängige Remanufacturer (Wiederaufarbeiter) entweder vorwärtsgerichteter (hersteller-orientierter) Supply Chains zunutze oder profitieren davon, dass auch aus eigentlich geschlossenen und Hersteller-kontrollierten Supply-Chain-Systemen wie einer CLSC Produkte und Komponente „ausscheiden“. [Kim et al., 2010], z.B. aufgrund von Lücken im Beschaffungsmanagement [Abbey et al., 2015] oder aufgrund von unabhängigen Remanufacturern, die Altteile „abfangen“ ([Ferrer und Swaminathan, 2006; Saavedra et al., 2013]. In einigen Fällen werden unabhängige Remanufacturer auch von Herstellern beauftragt, das Remanufacturing von Komponenten durchzuführen, die von den Herstellern zurückgeholt wurden und die während des Wiederaufarbeitungsprozesses Eigentum der Hersteller bleiben [Lind et al., 2014; Lund, 1984].

Um den Managementaufwand in CLSCs zu reduzieren, wurden Leasing- und Mietgeschäftsmodelle entwickelt, die ohne Eigentumsübergang funktionieren, sowie anreizbasierte Ansätze wie das Pfand, um die Umkehrung des Eigentumsübergangs zu fördern. Derartige Ansätze sowie sog. Produkt Service Systems werden häufig in Diskussionen zur Circular Economy als Lösungsansatz vorgeschlagen [z.B. EMF, 2013]. Allerdings stellt sich die Frage, ob Geschäftsmodell-Ansätze wie das Leasing tatsächlich umweltfreundlicher sind als der Verkauf (Eigentumsübergang). Dabei wird schnell deutlich, dass die Nachhaltigkeitsbewertung wesentlich von der Haltbarkeit des Produkts und von dessen Auswirkungen während der Nutzungsphase abhängig ist [Agrawal et al 2012]. Darüber hinaus können die Größe der

Sekundärmärkte und der Gebrauchswert des Produkts die Umweltauswirkungen des Remanufacturing (und auch der direkten Wiederverwendung) beeinflussen [Yalabik et al., 2014].

Insgesamt gibt es verhältnismäßig wenig Studien zu CLSCs, in denen unabhängige Marktteilnehmer (im Wettbewerb mit Herstellern) als zentrale Akteure im Vordergrund stehen und als Hauptakteure der CLSC agieren. Typischerweise fragen bisherige Studien vorzugsweise danach, wie Hersteller (OEMs) den Wettbewerb durch unabhängige Akteure am besten steuern können (z.B. durch Preise, Akquisitionsstrategien und Geschäftsmodelle). In empirischeren Studien treten unabhängige Akteure zwar häufiger in den Vordergrund. Allerdings fokussiert die Forschung dann nicht auf die Wettbewerbssituation dieser Akteure mit den Original-Herstellern sondern auf ihren Beitrag zum Remanufacturing [z.B. Saavedra et al., 2013]. So können gerade unabhängige Akteure in „reverse SCs“ ein wichtiger Treiber für die Hersteller sein, um eigene CLSCs zu begründen [Stindt et al., 2016].

Die im Rahmen von Cascade Use durchgeführte Forschung in diesem Kontext schaute besonders auf solche „Loops“, also Schleifen in Supply-Chain-Systemen, deren Akteure vorrangig unabhängig von Original-Herstellern sind, also CLSC nicht im engeren Sinne bilden, sondern eher in einem erweiterten Sinne. Derartige Aktivitäten außerhalb der Reichweite bzw. Kontrolle von Hersteller werden auch als "an unorganisierte Sektoren verlorenes Geschäft" bezeichnet [Bhattacharya et al., 2018]. Cascade Use bevorzugt eher eine Betrachtung in Anlehnung an Prahinski und Kocabasoglu [2006], die ähnlichen Systeme als "Open-Loop-Systeme" bezeichnen. Detailliertere Informationen sind in dem folgenden Artikel des Cascade Use Doktoranden Matthias Kalverkamp nachzulesen:

Matthias Kalverkamp, Steven B. Young (2019): In support of open-loop supply chains: Expanding the scope of environmental sustainability in reverse supply chains. In: Journal of Cleaner Production, 214, pp. 573-582; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.006>.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die NWG Cascade Use kooperierte von Beginn an mit dem Unternehmen **Calcar bzw. Callparts**, das ein Netzwerk von Autoverwertern in Deutschland verwaltet. Den Mitgliedern des Netzwerks wird z.B. eine Softwarelösung bereitgestellt, die bei der Demontage von Altautos und der Vermarktung von Altteilen unterstützt. Besonderes Augenmerk dieser Software liegt auf dem gesetzlich geforderten Berichtswesen zur Altautodemontage.

Mit dem **Hanse Wissenschaftskolleg (HWK)** in Delmenhorst wurden einige Netzwerkworkshops zum Thema Mobilität durchgeführt. Während 2014 das Thema „Electro Mobility -Assessing the Shift from Energy Efficiency to Material Efficiency in the Automotive Life Cycle“ erfolgreich durchgeführt wurde, begleitete Cascade Use Mitte 2015 ein internationales Netzwerktreffen gemeinsam mit dem **Hanse Wissenschaftskolleg** über Nachhaltige Mobilität, welches durch das **DAAD Projekt IPID4ALL** kofinanziert wurde. Vor allem Forscher aus Kanada und China (inkl. Kooperationspartner Prof. Chen Ming von der Shanghai Jiao Tong University mit 2 weiteren Doktoranden aus seinem Team) nahmen daran teil. Dieser Workshop war sehr gelungen und führten zum Beispiel zu einem Forschungsaufenthalt (auch hauptsächlich über IPID4ALL finanziert und nur kofinanziert von Cascade Use) der Nachwuchsgruppenleiterin Dr.-Ing. Alexandra Pehlken in Kanada, Waterloo (University of Waterloo) im Oktober 2015.

Weiterhin kooperierte die NWG Cascade Use mit Prof. Chen Ming von der **Shanghai Jiao Tong University**, China. Im Rahmen der Kooperation war ein Doktorand aus China für ein Jahr Mitglied der NWG in Oldenburg. Zusammen mit Prof. Ming wurde auch die AARTI Konferenz „International Symposium on Cascade Use of Automotive Parts 2017“ in Shanghai organisiert sowie die Cascade Use in Technologies Konferenz in Oldenburg 2018.

Neben den o.g. Kooperationen, die bereits bei Antragsstellung feststanden, hat die NWG Cascade Use ihr Kooperationsnetzwerk stetig erweitert. Hervorzuheben ist die Kooperation mit Prof. Steven B. Young von der **University of Waterloo**, Ontario, in Kanada. Frau Dr.-Ing. Pehlken kooperierte mit Prof. Young u.a. im Rahmen eines Special Issues zu „Assessing and managing life cycles of electric vehicles“ im International Journal of Life Cycle Assessment. Zudem kooperiert die NWG Cascade Use mit Prof. Thorsten Wuest von der **West Virginia University, Morgantown, USA** zur Forschung an der Schnittstelle der Kreislaufwirtschaft mit dem Produktlebenszyklusmanagement (s. Veröffentlichungen). Der Mitarbeiter Matthias Kalverkamp hat diese Kooperation maßgeblich vorangetrieben, ebenso wie eine Zusammenarbeit mit Prof. M. Jaber von der **Ryerson University, Toronto** und Dr. Bazan von Dixie Electric, Ontario, Kanada. Beide letztgenannten Kooperationen verstärkten sich nochmal gegen Ende der Nachwuchsgruppe.

Im Verlauf des Projekts haben sich weitere Kooperationen ergeben. Darunter hervorzuheben sind:

- a) Die Kooperation mit dem **Autorecycler LRP**. An diese Zusammenarbeit wurde auch im Rahmen eines Projektantrags angeknüpft, der die Arbeit am Tool RAUPE fortsetzen sollte.



- b) Die Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Kerstin Kuchta (**TUHH**). Mit der Arbeitsgruppe wurde über einen Unterauftrag hinaus gemeinsam zu Themen der Rückführung von Altgeräten (Schwerpunkt Elektronik) geforscht und der Cascade Use Mitarbeiter Kalverkamp war auch als Gastwissenschaftler in der Arbeitsgruppe von Frau Kuchta an der TUHH (s. Veröffentlichungen: Diedler et al. 2018).
- c) Prof. Eckhard Helmers von der **FH Trier, Umweltcampus Birkenfeld**. In der Zusammenarbeit mit Herrn Helmers wurde eine Studie zur Unsicherheit in Life Cycle Inventory Datenbanken erarbeitet (s. Veröffentlichungen).
- d) Die Zusammenarbeit von Herrn Kalverkamp mit Dr. Carlos Barrenechea von der **UTEM, Santiago de Chile und der Virtuellen Akademie Bildung Nachhaltige Entwicklung (va-bne), Bremen**, aus der ein spanischsprachiger Beitrag von Herrn Kalverkamp zu einer virtuellen Ringvorlesung hervorgegangen ist. Der Beitrag zum Thema Supply Chain Management im Kontext der Circular Economy ist mittlerweile verfügbar, steht jedoch nur ausgewählten Nutzern zur Verfügung (bei Interesse stellen wir Ihnen gerne einen Link zur Verfügung).
- e) Eine weitere Kooperation mit China hat sich durch die Kontaktherstellung von Prof. Chen Ming mit der **China University of Mining and Technology (CUMT)** aus Wuhan ergeben. Mit Prof. Jinsheng Xiao ergaben sich einige Publikationen und Doktorandenaustausche während der Laufzeit von Cascade Use und darüber hinaus.
- f) Als Gast in Cascade Use hatten wir den Postdoc Zhongkai Li aus China (**Xuzhou University**) für den Zeitraum vom 10.01.2015 – 09.01.2016, der ein Stipendium aus China erhielt, um mit uns zusammenzuarbeiten und mit uns gemeinsam zu publizieren.
- g) Die Kooperation mit Prof. Young (**University of Waterloo**) wurde auf Doktorandenebene weiter vertieft. Das große Interesse an einer Zusammenarbeit auf beiden Seiten mündete in der *mehrfach erfolgreichen* Beantragung von Mitteln für Auslandsaufenthalte bzw. Besuche (IPID4all) eines Doktoranden in Kanada. Diese co-finanzierte Kooperation lieferte einen wichtigen Beitrag zum Erfolg von Cascade Use. Der Aufenthalt wurde zur Datenerhebung über Beschaffungsmärkte des Recyclings und des Remanufacturings genutzt. Außerdem konnte von Kanada aus der Ableger der Industriemesse ReMaTec in den USA besucht werden, wo erneut wichtige Industrievertreter getroffen und Erkenntnisse über den Beschaffungsmarkt in Nordamerika gesammelt wurden. Nicht zuletzt durch diese Vernetzungsaktivitäten sind Industrievertreter auch direkt auf Mitglieder der Gruppe zugegangen und haben den Austausch forciert. Interessante Erkenntnisse zum unterschiedlichen Einsatz von IT-gestützter Beschaffungsmethoden zwischen Europa und Nordamerika fanden Einzug in das Cascade Use-Entscheidungstool sowie die Dissertation von Dr. Kalverkamp. Mehrere Konferenzbeiträge sowie ein Journalbeitrag sind durch diese Zusammenarbeit entstanden (s. Veröffentlichungen).
- h) Frau Pehlken wurde in das **EU COST ACTION** Netzwerk „recreew“ (<http://www.recreew.eu/>) als deutsche Ländervertreterin berufen und unterstützte bei der Sammlung und Vereinheitlichung der Datenbasis von Elektronikschrott. Dies kam der Forschung von Cascade Use deshalb zugute, da ein Großteil des Altautos aus Elektroschrott besteht und der Anteil stark anwächst.

II. Ausführliche Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendungen des Fördermittelgebers durch den Projektträger wurden entsprechend der im Antrag formulierten Ziele eingesetzt. Im Verlauf des Projektes kam es zu einzelnen Anpassungen der Zuwendungsverwendung im Vergleich zum ursprünglichen Plan. Im Folgenden wird die Verwendung der Zuwendungen anhand der einzelnen Arbeitspakete (1-3) dargestellt. Dabei wird konkret auf die Ziele und die Ergebnisse eingegangen. Da es sich bei diesem Forschungsprojekt um eine Nachwuchsgruppe handelte, standen natürlich auch die persönlichen Qualifikationen der einzelnen Mitarbeiter im Vordergrund.

Arbeitspaket 1: Entwicklung eines Informationsmodells für Automobilteile

Arbeitspaket 1 (AP1) konzentrierte sich vor allem auf die Gesamtperspektive auf Fahrzeugteile hinsichtlich des Marktumfeldes und dem Teile- und Materialbedarf. Dazu wurden Automobilteile geclustert sowie Potenzialanalysen mit Schwerpunkt auf Materialien erstellt. Zusätzliche technologische Entwicklungen wurden im Hinblick auf ihren Ressourcenbedarf und die Recyclingfähigkeit untersucht (z.B. Hybrid- und Elektroautos). Prozessschritte in Recyclingprozessen sind aufgrund des unterschiedlichen Material- und Massenstroms nicht genau festgelegt. Outputströme aus Recycling-Betrieben sind selten Materialströme, die von gleicher Qualität sind wie Primärressourcen. So ist beispielsweise Gummi aus Autos immer eine Mischung aus verschiedenen Gummiqualitäten, da es von verschiedenen Herstellern mit unterschiedlichen (geheimen) Rezepten hergestellt wird. Daher ist die Bewertung oft methodisch kompliziert, da die Qualität der vom Inputmaterial gelieferten Zahlen nicht genau bekannt ist. Darüber hinaus zeigen einige Stoffströme die Tendenz, Schadstoffe zu sammeln und müssen als Schadstoffsenken deklariert werden. Auf der anderen Seite gibt es Stoffströme, die sich als Verluste in die Umwelt ableiten wollen. Dies wird in WP1 und WP2 untersucht.

Auch das Potenzial des Closed Loop Recyclings (Autoteil zu Autoteil) wurde im Vergleich zum Open Loop Recycling (Autoteil zu Materialfluss) analysiert. Dazu zählt insbesondere die Kaskadennutzung. Dieser Aspekt wurde zudem um die Perspektiven des Supply Chain Managements auf „Loops“ erweitert (Closed Loops Supply Chains).

Bedingt durch den Einsatz von Batterien und eine zunehmende Zahl elektronischer Bauteile, wird ein Kraftfahrzeug aus einer Vielzahl höchst unterschiedlicher Materialien bestehen, von denen viele nur in begrenzten Quantitäten und/oder nur an wenigen Orten auf der Erde zu gewinnen sind. Als Motivation dient außerdem der seit einigen Jahren tiefgreifende Wandel der Automobilantriebstechnik weg vom herkömmlichen Verbrennungsmotor und hin zu alternativen Antrieben. Den ersten Wandel erfuhren wir mit der Einführung des Katalysators und aufgrund des stark

nachgefragten Elementes „Platin“ war sehr schnell ein Recyclingkonzept aufgestellt. Die heutigen wirtschaftsstrategischen Metalle im Auto sind jedoch nicht unbedingt nur einem Bauteil im Auto zuzuordnen (z. B. Elektronik mit Anteilen von Seltenen Erden, Indium und Gallium) bzw. sind in den neuen Batterietechnologien sowie dem Motor vorhanden (Lithium, Nickel, Kobalt, Seltene Erden in Form von Neodym, Dysprosium, Samarium, Terbium). In der breiten Öffentlichkeit gelten diese neuen Antriebstechnologien als „grün“, da sie augenscheinlich keine oder nur sehr wenige Emissionen verursachen und uns in dem Bestreben unterstützen, wertvolle und nur mit erheblichen Konsequenzen für die Umwelt zu fördernde Energieträger zu ersetzen. Diese Betrachtungsweise, die sicher nicht falsch ist, lässt allerdings einen wichtigen Aspekt außer Acht: Ein Kraftfahrzeug kann erst dann als „nachhaltig“ und „umweltverträglich“ in Herstellung und Betrieb bezeichnet werden, wenn der gesamte Lebenszyklus von der ersten Konstruktionsplanung über die Nutzungsdauer hinweg bis zum vollständigen Recycling auf einen nachhaltigen und effizienten Einsatz von Materialien und Energie hin optimiert worden ist.

Meilenstein 1: Markt- und Verbraucheranalyse des Gebrauchtwagenmarktes

Wesentlich für die Analyse des Gebrauchtwagenmarktes im Kontext von Cascade Use sind die Anzahl an Altfahrzeugen für das Autorecycling aber auch alternative Beschaffungswege von gebrauchten Fahrzeugteilen für die Wiederverwendung (oder das Recycling). Darüber hinaus ist das Verhalten der Verbraucher relevant.

Schon in der ersten Hälfte des Projektes wurde deutlich, dass eine originäre Untersuchung der Verbraucher bzw. des Verbraucherverhaltens aufgrund der Mittel aber besonders aufgrund der Ausrichtung der Forschung nicht sinnvoll abbildbar wäre. Beispielsweise wäre eine repräsentative Verbraucherbefragung nicht umsetzbar gewesen. Aus diesem Grund und aufgrund der in den ersten Monaten identifizierten Herausforderungen des Fahrzeugrecyclings sowie des (unabhängigen) Remanufacturings, fokussierte die Arbeit von Cascade Use im Wesentlichen auf die ökonomische Beschaffungssituation von Fahrzeugdemontage- und Schredderbetrieben, sowie von Händlern von Fahrzeugalt-/gebrauchtteilen und Remanufacturern. Weiterhin hat Cascade Use sich mit den Auswirkungen des technologischen Wandels im Antriebsstrang (Stichwort: Elektromobilität) auf die Beschaffungssituation beschäftigt.

Im Kontext von Altfahrzeugen für die Demontage (besonders mit dem Ziel Wiederverwendung/-verwertung) wurden Ursachen für rückläufige Verwertungsquoten und Versorgungsengpässe untersucht. Hierzu wurde von Frau Nuber eine Masterarbeit im Kontext der Fahrzeugverwertung und den Verwertungsquoten erstellt in der die Altfahrzeug-Behandlung in den EU-Staaten Deutschland und Österreich sowie in der Schweiz mit einem Fokus auf die Berechnungsmethoden für die Verwertungsquoten analysiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund von Defiziten in der Datenerhebung sowie der rechtlich zulässigen Möglichkeit unterschiedliche Berechnungsmethoden zu verwenden, die Quoten derart ungenau sind, dass sie auf EU-Ebene nicht vergleichbar sind. Anhand der Ergebnisse wurden Handlungsempfehlungen für die Datenerhebung und den Einsatz politischer Steuerungsinstrumente ausgesprochen. Diese haben zum Ziel, durch eine verbesserte Berechnungsmethode korrigierte und vor allem plausible Quotenwerte zu Verfügung zu stellen. Die

Arbeit verdeutlicht nochmals gut die statistischen Lücken, die schrittweise die ermittelten Fahrzeugverwertungsquoten beeinflussen. Die Arbeit entwickelt Lösungsansätze für diese Probleme und stellt einen wichtigen Beitrag zur Betrachtung von Unsicherheiten im Rahmen der Forschung von Cascade Use dar. Außerdem macht die Arbeit sehr gut deutlich, wie komplex das Problem des unbekanntem Verbleibs von Altfahrzeugen ist.

Neben dieser Arbeit, die sich einreicht in die entsprechende bundesweite Diskussion, liefert besonders die Untersuchung von Doktorand Kalverkamp zu den Herausforderungen des Marketing Systems wichtige Erkenntnisse. Demnach können Kreislaufsysteme für Wiederverwendung und Recycling zwar Ressourcen schonen und nachhaltigere Ergebnisse fördern, allerdings stellen Angebotsengpässe das europäische Reuse- und Recycling-Marketingsystem in Frage, insbesondere das Remanufacturing-Marketingsystem. Weiterhin konzentriert sich die aktuelle Forschung in diesem Zusammenhang besonders auf Mikromarketing-Perspektiven. Die Studie von Herrn Kalverkamp schließt diese Lücke, indem sie das System aus der Perspektive des Makromarketings analysiert, um Probleme in der „Reverse Supply Chain“ und deren Zusammenhang mit den Nachhaltigkeitsergebnissen des Systems besser zu verstehen. Die Analyse zeigt „einen gewissen Grad“ an Unvollkommenheit des Marktes („market imperfections“), die zu einer Verschwendung von Ressourcen und anderen Umweltauswirkungen führen. Die Studie trägt zu einem umfassenderen Verständnis des Remanufacturing- und damit verbundenen Marketingsystemen (z.B. Automobilrecycling) bei und liefert Implikationen für politische Entscheidungsträger und Vermarkter, die sich mit dem Design solcher Systeme befassen [vgl. Kalverkamp, Raabe 2017]. Außerdem wurde untersucht, wie auf Unternehmensebene die Beschaffung und damit die Versorgung der Produktion im Remanufacturing (Reuse-Ebene) verbessert werden kann. Eine vergleichende Studie von Herrn Kalverkamp liefert hier wichtige Erkenntnisse, die auch in die Entwicklung des Entscheidungstools Einzug fanden [vgl. Kalverkamp 2018]. Ziel dieser zweiten Studie war es, den Einfluss unabhängiger Akteure auf das Angebot von gebrauchten Fahrzeugteilen (und von Altteilen) zu untersuchen und zu verstehen, wie insbesondere Mittelsmänner/Zwischenhändler Werkzeuge des Supplier Relationship Management einsetzen, um Versorgungsengpässe im Remanufacturing von Automobilen zu reduzieren. Im Ergebnis kommt die Studie zu dem Schluss, dass Informationsasymmetrien und Transaktionskosten entscheidend dafür sind, dass sog. "open-loop Supply Chains" mit stärker integrierten „Closed-Loop Supply Chains“ (häufig von großen Zulieferern oder den Automobilherstellern dominierte Supply Chains) konkurrieren können. Diese Konkurrenz ist aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten wichtig [s. dazu auch Kalverkamp und Raabe 2017]. Die Studie identifiziert eine E-Procurement-Lösung, die damit verbundene Schwierigkeiten adressiert und darauf abzielt, das Angebot von Altteilen durch sog. "open loops" zu erhöhen. Darüber hinaus wird deutlich, dass gesetzliche Regulierung die Versorgung ungewollt behindern aber ebenso erleichtern kann. Demnach ist es wichtig, dass politische Entscheidungsträger sich mit den Konsequenzen von Gesetzgebung auf die Kreislaufwirtschaft intensiver auseinandersetzen. Mit anderen Worten: Die politischen Entscheidungsträger müssen diejenigen Rechtsvorschriften, die Lieferketten der Kreislaufwirtschaft behindern, überarbeiten. Besondere Vorsicht sollte hier gegenüber unabhängigen Akteuren gelten, damit die Kräfteverhältnisse im Marktsystem einen Wettbewerb ermöglichen, der auch ökologischer Nachhaltigkeit genug Potential bietet. Aus praktischer Sicht wurde deutlich, dass bei Anpassung des Supplier Relationship

Managements an die Anforderungen des Remanufacturing, sich das Lieferpotenzial durch "open-loop" SCs erhöhen kann. Die E-Procurement-Lösung könnte Lieferketten der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft über die Automobilauflbereitung hinaus unterstützen [vgl. Kalverkamp 2018].

Weiterhin unterstützte eine Masterarbeit des Informatikstudenten Shudong Sun Untersuchungen im Kontext des Meilensteins 1 sowie im AP 1 „Fokus auf neue Technologien, wie Elektro- und Hybridfahrzeuge und deren Ressourcenbedarf“. Die Arbeit fokussiert auf den Vergleich Deutschland - China.

Meilenstein 2: Clustern von Automobilteilen nach Rohstoffgehalt

Bei der Betrachtung der Nutzung bzw. Nutzbarkeit von gebrauchten Autoteilen gelangt man schnell zur Thematik der Rohstoffverfügbarkeit. Ist ein Rohstoff auf dem Markt einfach zu erhalten, so geht der Trend eher dazu über ein Bauteil neu zu produzieren. Ist die Produktion mit höheren Materialkosten verbunden, so entwickeln sich schnell Rückholkonzepte oder ein Recycling der Rohstoffe. Ein Recycling der Rohstoffe ist sehr eng mit der Einsparung von CO₂-Emissionen verbunden, da der Bergbau von Primärrohstoffen sehr energieintensiv sein kann. Als viel zitiertes Beispiel sei hier Aluminium genannt, welches beim Recycling (als Sekundärgewinnung) 90% der Energieersparnis im Vergleich zur Primärgewinnung erzielen kann. Da nicht alle Bauteile aus einem Werkstoff bestehen, ist eine Informationsgewinnung auf Rohstoffebene kompliziert.

Da ein Fahrzeug sehr komplex ist und in Zukunft noch komplexer wird (mehr Carbon, Elektromobilität, autonome Fahrzeuge) hat sich Cascade Use darauf verständigt das Informationsmodell auf die Elektronik zu fokussieren. Die Entscheidung beruht auf den folgenden Fakten:

- ✓ Stahlrecycling ist derzeit Stand der Technik und benötigt kein IT gestütztes Informationsmodell
- ✓ Elektronik nimmt im Auto stetig zu und nimmt in Zukunft einen wesentlichen Bereich ein (sowohl auf Hersteller- als auch auf Recyclingseite)
- ✓ Elektronikschrott ist rechtlich in der EU aufgrund der WEEE Verordnung sehr gut erfasst und statistisch erhoben
- ✓ Aufgrund des Anstiegs der Rohstoffpreise von Edelmetallen und vor allem der Platingruppenmetallen, erfährt der Stoffstrom der Elektronikaltgeräte eine erhöhte Aufmerksamkeit.

Das Konzept der Datenbank auf Material-, bzw. Rohstoffebene ist in Abbildung 4: Konzept der Darstellung der Datenbanken der Materialien Abbildung 4 dargestellt. Sie enthält die Verknüpfung bestehender aktueller Datenbanken über Rohstoffe, die anschließend in das Entscheidungsmodell eingebunden werden kann.

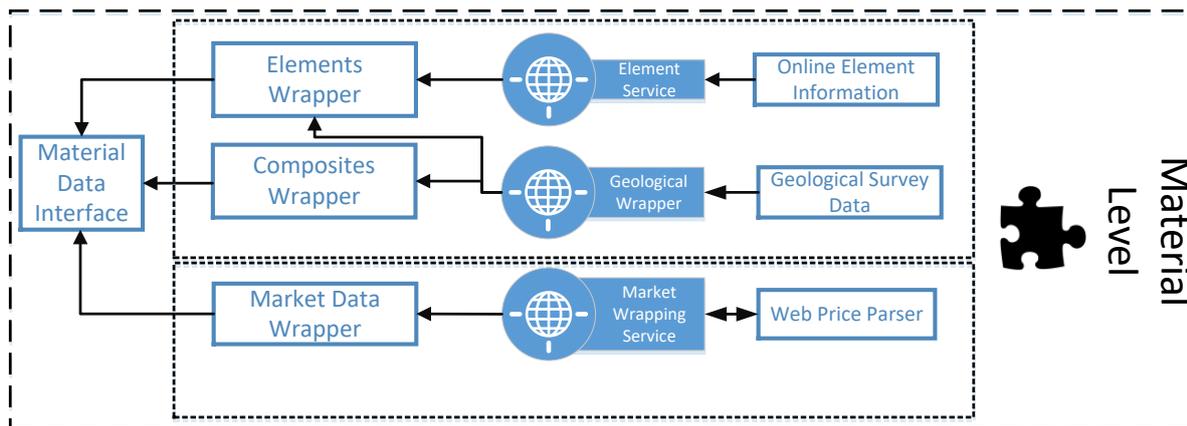


Abbildung 4: Konzept der Darstellung der Datenbanken der Materialien

Die Verbindung von Materialvielfalt, Recyclingzielen und rohstoffstrategischen Fragen machen eine umfassende Betrachtung des ganzen Lebenszyklus eines Fahrzeugs erst recht in Bezug auf Elektromobilität relevant. Ein gut funktionierendes Beispiel für ressourceneffizientes Recycling stellt das Potential der oben erwähnten Katalysatoren und der Platingruppenmetalle dar. Die ELV-Directive setzt klare Regeln für das Handhaben der Autokatalysatoren in der EU. In 2007 wurden 28t Platin und 31t Palladium aus Autokatalysatoren weltweit durch Recycling gewonnen, was 15% der jährlichen Weltprimärförderung der genannten Metalle entspricht. Aufgrund des Technologiewandels im Auto wird in Zukunft auch das Recycling zu überdenken sein. Verschiedene Studien befassen sich bereits mit dem Wandel [Angerer 2009, Buchert 2011, Sauer 2013]. Beim Elektrofahrzeug werden einige klassische Bauteile des ICE-Fahrzeugs wegfallen, wie der Verbrennungsmotor selbst, das Getriebe, die Kupplung, die Tankanlage, die Abgasanlage (inkl. Katalysator!), der konventionelle Kühler und die Wasserpumpe. Neuhinzukommende Komponenten werden hauptsächlich die Elektromaschine, die Batterie, sowie Batteriesystem und die Leistungselektronik betreffen. Der dadurch wachsende Bedarf an Metallen ist in der OPTUM Studie schon ermittelt worden [Buchert, 2011].

Die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe sind Gegenstand unzähliger Untersuchungen und überall als bedeutend für die Elektromobilität eingestuft. Der hohe Materialbedarf im Elektrofahrzeug steht allerdings auch in Konkurrenz mit anderen Anwendungen (z.B. Windkraftanlagen). In der Elektromobilität können nach Sauer [2013] folgende Elemente mit großer Priorität angegeben werden:

- **Neodym**
- **Praseodym**
- **Dysprosium**
- **Terbium**
- *Indium*
- **Gallium**
- *Germanium*
- *Gold*
- *Silber*
- *Kupfer*
- *Platin*
- *Palladium*
- *Ruthenium*
- **Lithium**
- **Kobalt**

Fett: Hoher Materialbedarf für die Elektromobilität
Kursiv: Geringer Materialbedarf für die Elektromobilität; aber hohe Konkurrenz mit anderen Anwendungen (z.B. Indium auch in Photovoltaikanlagen)

Platin und Palladium sind durch Autokatalysatorrecycling im derzeitigen Stand der Technik des Autorecyclings als gut funktionierende Sekundärströme einzuordnen. Auf das erwähnte Beispiel der 2007 durch Recycling weltweit gewonnenen Menge von 28t Platin und 31t Palladium aus Autokatalysatoren folgen Rohstofflöse von ca. 927 Mio. € für Platin (Rohstoffpreis Platin: 33.111€/kg am 29.01.2014) und etwa 523 Mio. € für Palladium (Rohstoffpreis Palladium: 16.876€/kg am 29.01.2014).

Aufgrund der hohen Bedeutung der Rohstoffe in dem ganzheitlichen Ansatz der Forschergruppe Cascade Use wurde die Rohstoffkritikalität auf der EU-Ebene intensiv beobachtet. Bis zum Abschluss von Cascade Use gab es drei Kritikalitätsstudien, die durch die Europäische Kommission durchgeführt und veröffentlicht wurden. Die Rohstoffinitiative wurde 2008 ins Leben gerufen, um den Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Zugang zu Rohstoffen zu begegnen, da eine große Mehrheit der Rohstoffe aus dem außereuropäischen Ausland kommt und Europa daher besonders von diesen Ländern abhängig ist. Die Erstellung einer Rohstoffkritikalitätsliste dient daher dazu die Rohstoffe mit hohem Versorgungsrisiko und großer wirtschaftlicher Bedeutung zu ermitteln, da ein verlässlicher und ungehinderter Zugang dazu für die europäische Industrie und die Wertschöpfungsketten wichtig ist [EC 2017]. Cascade Use hat daher alle kritischen Rohstoffe sowie die Kritikalitäts-Kandidaten (= Kandidaten, die „noch“ knapp unter der Grenze liegen) aus der EU-Kritikalitätsbewertung bis zum Stand 2019 in ein interaktives Periodensystem überführt, das sehr übersichtlich und einfach die Rohstoffe mit einem Klick anzeigt. Dabei sind die wesentlichen Fakten und Daten der Rohstoffe tabellarisch erfasst. Das Periodensystem ist auf der Cascade Use Webseite unter dem Link: <https://uol.de/cascadeuse/forschungsthemen/kritische-rohstoffe> veröffentlicht worden.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	* 73 Ta	* 74 W	* 75 Re	* 76 Os	* 77 Ir	* 78 Pt	* 79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	* 105 Db	* 106 Sg	* 107 Bh	* 108 Hs	* 109 Mt	* 110 Ds	* 111 Rg	* 112 Cn	* 113 Nh	* 114 Fl	* 115 Mc	* 116 Lv	* 117 Ts	* 118 Og
			* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu	
			* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr	

Abbildung 5 Periodensystem der kritischen Rohstoffe nach EU Kriterien 2017 (eigene Abbildung)

Zusätzlich konnten wertvolle Ergebnisse aus dem EU Projekt Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes (PROSUM) [Huisman et al 2017] genutzt werden, die ihre Ergebnisse ebenfalls online publizierten und machten es daher möglich aus dem Altautoaufkommen auf die Komponenten-, bzw. Materialzusammensetzung zu schließen:

<http://www.urbanmineplatform.eu/composition/vehicles/components>.

Die Daten aus PROSUM flossen neben anderen EU-finanzierten Projekten in die neue EU Datenbank „Raw Materials Information System – RMIS“ ein (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>). Daher war es vor Entwicklung des Entscheidungstools nicht eindeutig, welche konkreten Daten in das Werkzeug einfließen, sondern wie die verschiedenen Datenbanken an das Entscheidungstool vernünftig integriert werden konnten (siehe AP3).

Arbeitspaket 2: Bewertung der Kaskadennutzung und weiteren Lebenszyklen

Das AP2 "Bewertung der Kaskadennutzung und weiteren Lebenszyklen" konzentriert sich auf die Bewertung von Technologien und Märkten im Hinblick auf Umweltauswirkungen. Die angewandten quantitativen Methoden sind hauptsächlich die Materialflussanalyse (MFA) und die Lebenszyklusanalyse (LCA). Als Werkzeug zur Durchführung von LCAs wurde die Software „GaBi“ (thinkstep AG) und für die MFA die Freeware "STAN" (TU Wien) eingesetzt. Auf technologischer Ebene ist die Bewertung von Recyclingprozessen immer mit Unsicherheiten verbunden, da nicht alle Stoffströme genau bestimmt werden können. Weiterhin ergeben sich Unsicherheiten aus der Nutzung externer Datenbanken (Life Cycle Inventory database) für die Ökobilanzierung, unterschiedlichen Datenquellen, die wiederum die Datenbanken speisen, sowie unterschiedlicher Modellierungsansätze für die jeweiligen Datenbanken. In diesem AP wurde auch zu den Auswirkungen dieser Unsicherheiten auf die Ergebnisse von Ökobilanzen geforscht.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen dieses APs wurden zudem quantitative Methoden genutzt. Diese fußen im Wesentlichen auf leitfadengestützte Interviews und Case Studies, die im Rahmen eines an der Grounded-Theory orientierten Forschungsansatzes ausgewertet und analysiert wurden.

Ökologisch signifikante Auswirkungen des später in AP3 entwickelten Entscheidungsinstruments (RAUPE) sind nur zu erwarten, wenn das Instrument von den betroffenen Akteuren und Entscheidungsträgern angenommen und angewendet wird, wobei das Ausmaß dieser Effekte stark von den jeweiligen Potenzialen und Entwicklungen auf den unterschiedlichen betroffenen Zweitmärkten abhängig ist. Zu den Märkten zählen Sekundärrohstoffmärkte, der Gebrauchtteilemarkt und der Markt für Alt-/Gebrauchtteile für die Refabrikation (Remanufacturing). Daher ist es von großer Bedeutung, Kriterien für die Akzeptanz und Annahme des Instruments zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden Akteure befragt sowie Marktstrukturen, marktrelevante Institutionen und Abweichungen in den jeweiligen restriktiven Rahmenbedingungen untersucht. Bei dieser Untersuchung wurde zunächst davon ausgegangen, dass ein besonderer Vergleich mit den Marktbedingungen in China stattfinden wird. Dieser Aspekt war deshalb angestrebt worden, da kulturelle Unterschiede hinsichtlich des Untersuchungsobjektes „PKW/Automobil“ zu erwarten sind. Das Auto als Statussymbol verliert in Deutschland an Gewicht während hier Nachhaltigkeitsaspekte wie sie z.B. durch Car-Sharing-Lösung

propagiert werden, an Status gewinnt. In China wiederum genießt der PKW weiterhin einen besonderen Stellenwert als Symbol wirtschaftlichen Aufstiegs (des Einzelnen). Durch die Kooperation hätten sich im Forschungsansatz einer dezentralen, multikulturellen Organisation der Forschung, kulturelle Unterschiede eingrenzen oder überwinden lassen, die die Vergleichbarkeit der Forschung erschweren könnten (z.B. Respondent Bias). Insbesondere organisatorische Einflüsse durch einen typisch ethnozentrischen Tenor der Forscher aus dessen Herkunftsland ("Researcher Bias") sollten vermieden werden [Hanges et al. 2005].

Aufgrund von Schwierigkeiten die entsprechende Doktorandenstelle zu besetzen, war dieses Projektziel in dem Umfang nicht realisierbar. Dem gegenüber stehen jedoch umfangreiche Ergebnisse aus vergleichenden Arbeiten mit Nordamerika. Aufgrund dieser Entwicklung wurde auch die Methodenwahl angepasst. Die kulturellen Aspekte in der Wahrnehmung und Vermarktung von gebrauchten Teilen haben ein geringeres Gewicht im Vergleich Deutschlands und (Nordwest-) Europas mit Nordamerika denn mit China. Stattdessen wurden in einem Grounded-Theory orientierten Forschungsansatz das Marketing System für Alt-/Gebrauchteilrückführung mit Fokus auf Remanufacturing analysiert und mit Nordamerika verglichen. Eine weitere, praxisorientiertere Arbeit vergleicht anhand von Beschaffungsansätze der betriebswirtschaftlichen Forschung das Vorgehen der Akteure in der Lieferkette von der Altfahrzeugdemontage über Altteilehändlern hin zu Refabrikationsbetrieben. Diese Lieferkettenbetrachtungen brachten ebenso wichtige Erkenntnisse für die direkte Wiederverwendung (Gebrauchteile) sowie über den Altfahrzeugmarkt (s. Meilenstein 1).

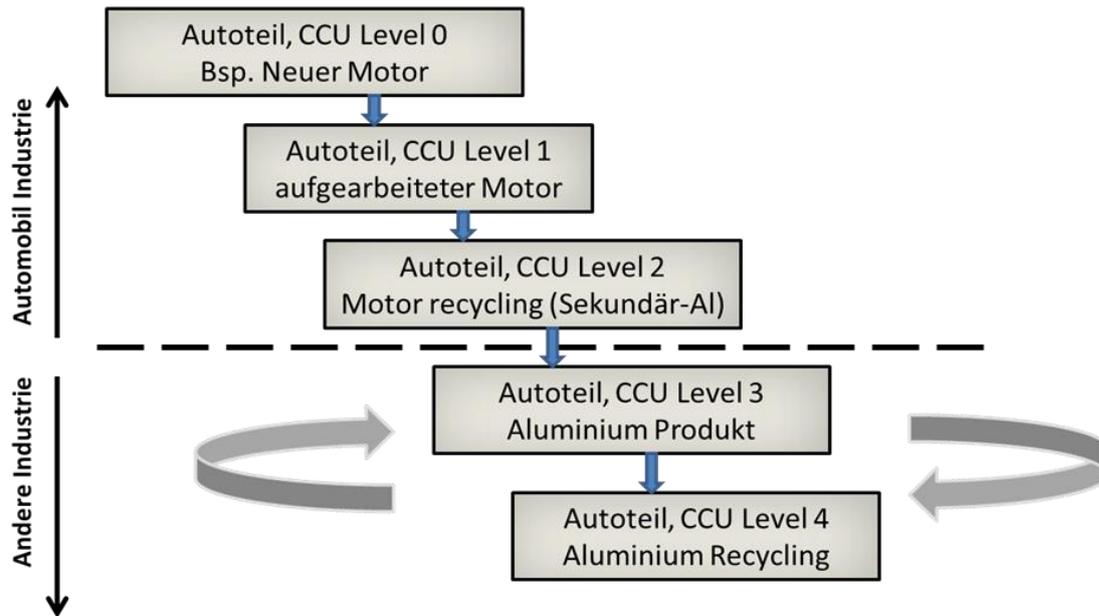
Begriff der Kaskadennutzung²

Die Kaskadennutzung umfasst in der Umgangssprache die Mehrfachnutzung eines Rohstoffs über mehrere Stufen. Dies bedingt in der Regel eine besonders nachhaltige und effektive Nutzung sowie eine Einsparung beim Rohstoffeinsatz von Rohstoffen. In der Biomassenutzung ist dies ein sehr oft genutzter Ansatz, bei nichtbiologischen Produkten ist er eher seltener gebräuchlich [Kalverkamp et al 2017]. Der zentrale Ansatz einer Kaskadennutzung basiert auf der Fragestellung:

Welche strategischen Ressourcen und Reststoffe sind geeignet für eine ökologisch und ökonomisch effiziente Kaskadennutzung und ist dieser Ansatz der Kaskadennutzung übertragbar auf das Automobil?

Das Potential des nachhaltigen Ressourcenmanagements ist als sehr hoch anzusehen und Wiederverwendung hat meist die beste Umweltrelevanz und verursacht die geringsten Emissionen. Bauteile unterscheiden sich dabei in a) Bauteile ohne Wiederaufarbeitung und b) aufgearbeitete Bauteile (remanufactured, CCU Level 1). In beiden Fällen wird der Eintrag neuer Ressourcen stark minimiert und strategische Ressourcen bleiben länger im Kreislauf erhalten. Recyclingbauteile, die weder unter a) noch b) fallen, werden werkstofflich verwendet und gelangen in neue Produkte (CCU Level 2 und höher), in Fällen von heizwertreichen Fraktionen auch energetisch. Dies ist in Abbildung 6 am Beispiel eines Verbrennungsmotors aufgezeigt, der vorrangig aus Aluminiumguss besteht.

² Für nachfolgenden Abschnitt vgl. Pehlken und Kalverkamp, 2015



CCU Level X = Cascade Use Level des Produktes

Abbildung 6 Kaskadennutzung eines Bauteils (hier: PKW Motor)

Das übergeordnete Forschungsziel ist ein zu entwickelndes Entscheidungstool (s. Arbeitspaket 3), welches auf einem Ökobilanzansatz und Materialflussanalyse aufbaut und die ökonomische sowie ökologische Last von Altautobauteilen bestimmt und bewertet. Die Grenzen der Kaskadennutzung werden in ein zu entwickelndes Entscheidungstool (Decision Tool) eingebunden. Dabei wird eine Methode zur Einschätzung der lebenszyklusübergreifenden Materialverfügbarkeit entwickelt werden. Anhand der errechneten ersparten CO₂-Emissionen innerhalb der Recyclinghierarchie kann der Beitrag zur Ressourcenschonung bestimmt werden. Gerade im Bereich von strategischen Rohstoffen, die im Auto häufig dispers verteilt sind, ist die Hemmschwelle zum Recycling oft sehr hoch, da eine hohe Anzahl von Bauteilen demontiert, gesammelt und zum Recycler transportiert werden muss. Vielfach sind die Kosten der Demontage schon so hoch, dass sich die weitere Aufbereitung kaum lohnt [Kohlmeyer, 2013]. Mithilfe eines Entscheidungstools werden aktuelle Informationen zum Autorecycling und zur Autozusammensetzung in ein Modell überführt, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Das Entscheidungstool soll Behörden, Regierungsvertretern, Firmen und Forschern dienen, um ihre eigene Nachhaltigkeitsstrategie bzw. -ziele im Hinblick auf strategische Ressourcen zu verfolgen. Es macht den weiteren Verwendungsweg unter besten Ressourceneffizienzstrategien von Sekundärrohstoffen deutlich und minimiert rohstoffliche Verluste in Zukunft.

Closed-Loop Supply Chains and Remanufacturing³

Kreislaufartige Produktströme sind für die Wiederaufbereitung entscheidend, obwohl Kreisläufe das Supply Chain Management komplexer machen. Die Schließung des Kreislaufs vom End-of-Use/-Life zu neuen Produktlebenszyklen stellt besonders die Beschaffungsseite vor große Herausforderungen [Östlin et al., 2008]. Entsprechende Supply Chains stehen vor Fragen wie der Identifizierung von Beschaffungsquellen [Guide und van Wassenhove, 2009], dem Ausgleich von Angebot und Nachfrage [Daniel et al., 2000] oder operativen Fragen der Rückführlogistik (reverse logistics) und der Durchlaufzeit für die Rückführung [Östlin et al., 2008]. Die Literatur konzentriert sich in diesem Kontext besonders auf geschlossene Lieferketten sog. Closed-Loop Supply Chains, die in der Regel (oder im Idealfall) von einem zentralen Akteur für die Kreislaufführung von Produkten und Materialien gesteuert werden [Guide und van Wassenhove, 2009].

Die Literatur zu Supply Chains für das Remanufacturing (Refabrikation) konzentriert sich hauptsächlich auf normative Ansätze [Guide und van Wassenhove, 2009; Prahinski und Kocabasoglu, 2006], operative Aspekte der Produktionsplanung [Gaur et al., 2017] oder strategische Fragen [Chen et al., 2016]. Deutlich weniger Studien befassen sich mit Verhaltensfragen [Atasu et al., 2008], z.B. wie der Endkunden sich in diesen Systemen verhält [O'Reilly und Kumar, 2016]. Die Closed-Loop-Supply-Chain-Literatur befasst sich auch damit, wie Eigentumsfragen den Produkt- und Materialfluss beeinflussen [Hagelüken, 2007]. So vermeiden Closed-Loop Supply Chains idealerweise den Eigentumsübergang [Thierry et al., 1995] oder nutzen Anreize wie ein Pfand, um die Rückführung von Produkten zu verbessern [Östlin et al., 2008]. Allerdings gewinnen die Remanufacturer regelmäßig weniger Komponenten über eine Closed-Loop Supply Chain zurück, als sie in den Supply-Chain-Kreislauf eingespeist haben [Saavedra et al., 2013]. Die so entstehenden Verluste zusammen mit der tatsächlichen Ausbeute aus den zurückgeführten Produkten reduzieren die Anzahl der wiederverwertbaren Komponenten (von allen zurückgeführten Produkten lassen sich nicht 100% tatsächlich aufbereiten). Daher benötigen Remanufacturer zusätzliche Versorgungskanäle [Sundin und Dunbäck, 2013]. Eine klassische vorwärtsgerichtete Supply Chain oder aber „Leckagen“ aus Closed-Loop Supply Chains können einen Teil der zusätzlich notwendigen Versorgung mit Altteilen (sog. Cores) sicherstellen [Kalverkamp et al., 2017].

Um eine bessere Differenzierung zwischen Supply Chain-Ansätzen und Zielsetzungen vornehmen zu können, sowie auch die Umweltwirkung differenzierter betrachten zu können, wurde das Konzept der Open-Loop Supply Chain entwickelt. Ein wichtiger Unterschied zur Closed-Loop Supply Chain nach klassischer Definition (mit Herstellerzentrierung) ist, dass der Hersteller diese Supply Chain nicht kontrolliert. Wesentlich ist, dass auch unabhängige Remanufacturer Produktkreisläufe schließen. In diesen Fällen kehren die Produkte nicht an den Hersteller zurück, sondern an den unabhängigen Remanufacturer, der die Kontrolle in einem zuvor offeneren Produktionskreislauf behält. In der Literatur werden unter dem Begriff der Closed-Loop Supply Chain auch derartige „umgekehrte“ Supply Chains unabhängiger Akteure betrachtet, obwohl viele Studien einen expliziten oder impliziten Fokus

³ Für nachfolgenden Abschnitt vgl. Kalverkamp und Young, 2019 und Kalverkamp, 2018.

auf den Hersteller als zentralen Akteur haben, der als Bezugspunkt für Verbesserungen und Managemententscheidungen im Kontext von Kreisläufen dient. Darüber hinaus konzentriert sich die Closed-Loop Supply Chain im engeren Sinne implizit auf den Hersteller als zentralen Akteur, da sie "Design, Steuerung und Betrieb eines Systems.... über den gesamten Lebenszyklus..." umfasst [Guide und van Wassenhove, 2009: 10]. Im Gegensatz dazu ist ein unabhängiger Remanufacturer nicht an der anfänglichen Gestaltung des Produktlebenszyklus beteiligt und kann daher kaum eine Closed-Loop Supply Chain in diesem engeren Sinne etablieren.

Eine Supply Chain, die Altteile (die „Cores“) aus vorwärts gerichteten Supply Chains oder auch aus den „Leckagen“ einer Closed-Loop Supply Chain gewinnt, um tatsächlich einen Kreislauf mit der Absicht zu schließen, daraus Produktwerte durch direkte Wiederverwendung und Remanufacturing zu gewinnen, sollen demnach als Open-Loop Supply Chain bezeichnet werden. Häufig sind unabhängige Akteure wie Altteihändler und gelegentlich auch Remanufacturer selbst die treibende Kraft hinter sog. Open-Loop Supply Chains für Fahrzeugaltteile. Aber auch Hersteller können Altteile von diesen Akteuren beziehen. Diese Perspektive auf Open-Loop Supply Chain ähnelt dem von Prahinski und Kocabasoglu [2006] entworfenen „Open-Loop-System“. Die Versorgung anhand derartiger Open-Loop Supply Chains schließt zwar Kreisläufe ähnlich wie eine Closed-Loop Supply Chain, sie steht aber vor zusätzlichen Herausforderungen.

Studien von Cascade Use liefern zur Differenzierung der Supply Chains und zur Rolle der unabhängigen Akteure einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wichtige Beiträge. Diese Akteure standen bisher nicht im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten zu Closed-Loop Supply Chains oder zum Remanufacturing. Insbesondere deren spezifischen Herausforderungen aber auch deren Beitrag zur ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wurden kaum beachtet. Eine vergleichende Analyse der Akteure und deren Handelsprozesse in Nordamerika und Westeuropa zeigt auf, welche Herausforderungen für die Altteil-Versorgung durch Open-Loop Supply Chains bestehen.

Beschaffung und Open-Loop Supply Chains⁴

Besondere Herausforderungen sind die wachsende Komplexität der Fahrzeugkomponentenidentifikation und die breite Lieferantenbasis. Die Reduzierung von Informationsasymmetrien und Transaktionskosten ist entscheidend für unabhängige Supply Chains zur Wiederaufbereitung, um im Wettbewerb mit stärker integrierten Closed-Loop Supply Chains zu bestehen. Effizienzsteigerungen auf der Ebene der Intermediäre (Altteihändler) können Versorgungsengpässe reduzieren. Die Beziehungspflege zu Transaktionspartnern ist unerlässlich, um die Rückführung von Altteilen (cores) sicherzustellen [Subramoniam et al., 2010. Östlin et al. (2008) und Lind et al. (2014)] identifizieren eine Vielzahl von Beziehungen in sog. reverse Supply Chains für das Remanufacturing (ownership-based, service contract, direct-order, deposit-based, credit-based, buy-back, voluntary-based, and reman-contract). Ausgehend von diesen Beziehungen betrachten

⁴ Für nachfolgenden Abschnitt vgl. Kalverkamp, 2018

Sundin und Dunbäck [2013] die "Rückkaufsbeziehung" zwischen den Remanufacturern und Ihren Lieferanten , den Altteilehändlern, als einen „Mangel an Beziehung“.

Das Supplier Relationship Management (SRM) zielt darauf ab, durch Kommunikation und Koordination ein verbessertes Management komplexer Beziehungen zu ermöglichen. IT-basierte Lösungen erleichtern das Management, indem sie Aufgaben und Prozesse im Zusammenhang mit dem Beschaffungsprozess unterstützen [Herrmann und Hodgson, 200]). Die Automobilindustrie ist ein Pionier des Supply Chain Management und die Anwendung von Beschaffungsansätzen wie im Supply Relationship Management dargelegt [Holweg, 2005]. Trotz ausgeklügeltem Supplier Relationship Management in der Automobilindustrie gibt es nur wenige Belege für vergleichbar entwickelte Ansätze im unabhängigen automobilen Remanufacturing. Zu den wenigen Beispielen gehören CoremanNET, eine Logistiklösung für das Core Return Management (www.coremannet.com) und LevelSeven, eine Microsoft Dynamics-basierte Lösung (www.lvlsvn.com). Diese und andere Lösungen können jedoch nicht die besonderen Anforderungen an Rückkaufbeziehungen für automobiler Altteile (cores) befriedigend abdecken.

Obwohl sog. Core Broker (Zwischenhändler für Altteile) in Nordamerika und Europa in zunächst recht ähnlichen Marktpositionen sind, zeigen ihre Ansätze im Lieferantenmanagement einen Unterschied zwischen den Regionen. Core Broker und Remanufacturer stehen gleichermaßen vor der Herausforderung, dass die korrekte Identifizierung von Teilen aufgrund der verwirrenden Vielfalt und Komplexität der Hersteller-Autoteilenummern immer schwieriger wird. Diese Komplexität reduziert die Transparenz und fordert die Händler heraus, korrekte und gut sortierte Chargen an Altteilen bereitzustellen, die dann auch höhere Verkaufspreise erzielen würden. Die Forschungsergebnisse aus Europa deuten darauf hin, dass der Beschaffungsprozess der Core Broker in Europa für Altteile noch stark auf persönlichen Beziehungen beruht und Einkäufe persönlich, telefonisch oder anhand von Excel-Listen angebahnt werden. Für Demontagebetriebe scheint dieser persönliche Kontakt und die Barzahlung bei Verkauf einen besonderen Stellenwert zu haben. Im Gegensatz dazu identifiziert die Feldforschung in Nordamerika IT-basierte Beschaffungslösungen für das Core Broking auch über größere Entfernungen zwischen Dismantlern und Core Brokern hinweg. Diese E-Procurement-Lösungen richten sich insbesondere an die korrekte Identifizierung von Altteilen in Kombination mit Preisinformationen. Diese E-Procurement-Lösung erleichtert im Sinne des Supplier Relationship Managements die Logistikprozesse indem sie beispielsweise Versandlisten mit den demontierten Teilen bereitstellt oder die Abholung von demontierten Teilen organisiert sowie die Zollabwicklung unterstützt.

IT-Tools, die die Identifizierung des Altteils in Kombination mit anderen Anreizen für Lieferanten erleichtern, können den Kreislauf der gebrauchten Produkte in die Wiederaufarbeitung und in die Wiederverwendung im Allgemeinen unterstützen. Daher können solche Instrumente auch übergeordneten Nachhaltigkeitszielen dienen. Inwieweit E-Procurement-Tools jedoch die weithin beklagte Knappheit an Altteilen für das Remanufacturing reduzieren helfen, muss weiter untersucht werden. Ebenso wie das Potenzial für E-Procurement in anderen Wiederverwendungsindustrien, wie beispielsweise der Elektronik (Weißgeräte, Unterhaltungselektronik, etc.).

Industrie und Politik können dazu beitragen, das Angebot an sog. Cores zu erweitern. Die Marktakteure sind für die Anwendung von Relationship Management Ansätzen verantwortlich, die potenzielle Lieferanten anziehen. Dennoch erfordern einige der identifizierten Supply Chain Hindernisse, dass Regierungen ein Marktumfeld schaffen, das das Remanufacturing als Teil einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft stärker unterstützt.

Umweltwirkung und Open-Loop Supply Chains⁵

Warum es sinnvoll wäre, die Aktivitäten unabhängiger Akteure zu begrüßen und diese sogar zu stärken zeigt eine Arbeit zur Umweltwirkung von sog. Open-Loop Supply Chains im Vergleich mit ausgewählten Beispielen typischer herstellerzentrierter Closed-Loop Supply Chains. Es stellt sich im Kontext der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft die Frage, ob „geschlossene Kreisläufe“ wie eine Closed-Loop Supply Chain tatsächlich unerlässlich sind und ob eine differenziertere Berücksichtigung unabhängiger Akteure im Rahmen von Kreisläufen in Supply Chains sinnvoll ist.

Aufgrund des einfacheren Managements der Aktivitäten einer Closed-Loop Supply Chain, die weniger zwischengeschaltete Akteure und direktere Versorgungswege im Vergleich zu einer open-loop Supply Chain umfasst, scheint die Closed-Loop Supply Chain Nachhaltigkeitsvorteile zu haben und wird allgemein befürwortet [Difrancesco und Huchzermeier, 2015; EMF, 2013; Guide und van Wassenhove, 2009]. Unabhängige Remanufacturer scheinen jedoch im Vergleich zu OEMs eine stärkere Motivation zu haben, wiederaufbereitete Komponenten tatsächlich auch zu verbessern und innovative Marktbeziehungen aufzubauen. Der Fokus auf Closed-Loop Supply Chains, die aufgrund des Herstellerbezugs bessere Produktkenntnisse haben sollten und wo der Einfluss auf die Supply Chain von Hersteller ausgeht, ist für die Nachhaltigkeit demnach irrelevant. Wie bereits dargestellt, leisten unabhängige Akteure wertvolle Beiträge zur Schließung von Kreisläufen. Weiterhin bieten unabhängige Akteure und deren Lieferketten mehr Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle und Innovation, die die Wiederverwendung (und das Recycling) voranzutreiben. Tatsächlich zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass diese „open-loop“ Supply Chains unabhängiger Akteure das Potenzial haben, die Primärproduktion von Rohstoffen zu verschieben und damit die Umweltbelastung zu reduzieren. Dies stellt die etablierte Annahme in Frage, dass Closed-loop Supply Chains per se das zu bevorzugende Modell für nachhaltige Supply Chains sind.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den aktuellen Forschungen der Industriellen Ökologie zum Thema Recycling [Zink und Geyer, 2017]. Trotzdem muss berücksichtigt werden, dass immer eine Einzelfallanalyse erforderlich ist, um die Umweltwirkung abzuschätzen [Agrawal et al., 2012] und bei der Bewertung sowohl physische als auch marktbezogene Faktoren berücksichtigt werden müssen [Yalabik et al., 2014]. Tatsächlich deutet die Literatur darauf hin, dass es zu sog. Rebound Effekten in der Umwelt kommen kann, die schließlich zu einer unproduktiven Kreislaufführung beitragen [Skene, 2017; Zink und Geyer, 2017].

⁵ Für nachfolgenden Abschnitt vgl. Kalverkamp und Young, 2019

Meilenstein 3: Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung erfolgte auf unterschiedlichen Ebenen. Zum einen wurden Studien zu Stoffströmen sowie zur Ökobilanzierung durchgeführt. Zum anderen flossen Meta-Ergebnisse aus anderen Studien in die Bewertung einzelner Wiederverwendungs- und –Verwertungsaktivitäten ein. Zur Ökobilanzierung und zur Stoffstromanalyse und damit zur Erreichung dieses Meilensteins im Rahmen des AP2 wurden unterschiedliche Werkzeuge genutzt. Dazu zählen die Software GaBi von der thinkstep AG mit deren LCI Datenbank GaBi professional und der LCI Datenbank „ecoinvent“. Die notwendige Expertise im Umgang mit Ökobilanzen wurde durch Frau Dr. Pehlken sichergestellt. Weiterhin nutze insbesondere der Doktorand den Support der Fa. thinkstep (entsprechender Support-Vertrag wurde abgeschlossen). Unter den Arbeiten im Rahmen dieses Meilensteins ist die Masterarbeit von Frau Neele Karbe besonders relevant, da diese in engem Zusammenhang mit der Vergleichsstudie Kalverkamp, Helmers und Pehlken [2020] steht. Diese Masterarbeit unter der Anleitung von Herrn Kalverkamp leistete einen wichtigen Beitrag zum Thema „Unsicherheiten“ und stellte daher ein Bindeglied zwischen AP 2.3 und AP 2.2. dar und lieferte zudem eine gute Datenbasis auf der weiterhin aufgebaut wurde.

Weiterhin nutzte die Gruppe das Softwaretool STAN der TU Wien. Für das gesamte Cascade Use Team wurde eine Fortbildung in der Anwendung der Software STAN durchgeführt. Workshopleiter war Oliver Cencic, dem Entwickler der Software von der TU Wien, der im Kontext der Materialflussanalyse zu den weltweiten Experten zählt. Da durch dieses Kursformat auch die studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräfte an der Fortbildung teilnehmen konnte, konnte diese selbstständiger an Materialflussanalysen arbeiten und so entsprechend zum Erfolg der Gruppe beitragen.

Als wichtiger Beitrag zum Meilenstein wurde bereits auf die Studie Kalverkamp et al. (2020; nachfolgende Absätze beziehen sich auf diese Studie) verwiesen. Diese Studie untersucht, wie die Wahl der Datenbank für eine Sachbilanz (LCI) das Ergebnis einer Ökobilanz beeinflusst. Hier stellte Cascade Use die Frage, ob sich LCA-Anwender und (politische) Entscheidungsträger auf LCA-Studien verlassen können, die auf einer bestimmten LCI-Datenbank basieren und schlicht deren Anwendbarkeit auf den Untersuchungsgegenstand annehmen. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, inwiefern eine alternative LCI-Datenbank den Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor beeinflusst. Entsprechende Fahrzeuglebenszyklen, die ebenfalls das Recycling berücksichtigen und bereits in einer ecoinvent-basierten Studie veröffentlicht wurden [Helmers et al. 2017], wurden erneut mit GaBi professional abgebildet, untersucht und abgeglichen. Die Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse, da sie Einschränkungen aufgrund der verwendeten LCI-Datenbanken aufzeigen.

Bei der Verwendung verschiedener Datenbanken kann es zu Abweichungen kommen. Betrachtet man beispielsweise alle hier untersuchten Midpoint-Kategorien, so zeigen die Ecoinvent-basierten Daten einen allgemeinen Trend zu einer positiven Abweichung (d.h. zu höheren Werten) im Vergleich zu GaBi-basierten Modellierungsergebnissen (es gibt jedoch Ausnahmen). Die Abweichungen bei Indikatoren wie Klimawandel, Verbrauch von fossilen Rohstoffen und Metallen, Partikelbildung und terrestrische Versauerung liegen alle in einem relativ kleinen Bereich von etwa 15 % (von einigen

Ausnahmen abgesehen). Die Wirkungsindikatoren Ionisierende Strahlung, (Süßwasser- und Meerwasser-Eutrophierung, Natürliche Landtransformation, Ozonabbau, Terrestrische Ökotoxizität, Urbanes Land und Wasserentnahme zeigen jedoch viel größere Abweichungen in ihren absoluten Ergebnissen. Mit Ausnahme von terrestrischer Ökotoxizität und Wasserentnahme weisen sie auf höhere Wirkungswerte für die Ecoinvent-basierten Modellierungen hin. Aber die größten Abweichungen sind alle negativ (kleinere Werte als GaBi) und 8 der Top-10-Abweichungen (alle über |100 %|) liegen in den Kategorien Terrestrische Ökotoxizität und Wasserverbrauch (jeweils vier Werte). Die restlichen beiden Abweichungen über |100 %| gehören zur landwirtschaftlichen Flächennutzung der Modellierungen des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor.

Zusammengefasst zeigen die Studienergebnisse, dass die Vorteile einer Ökobilanz von Elektroautos von der verwendeten LCI-Datenbank abhängen können. Mit dieser Studie hat Cascade Use einen wichtigen Beitrag zur Einschätzung ökologischer Bewertungen alternativer Antriebskonzepte im Kontext der Kreislaufwirtschaft geleistet. Die Auswahl der Datenbank kann die Ergebnisse beeinflussen und die Interessengruppen der Ökobilanz sollten dahingehend ermutigt und befähigt werden, Ökobilanz-Studienergebnisse zu überprüfen.

Als weitere Bausteine für diesen Meilenstein sind die Arbeiten aus der Kooperation mit Prof. Young von SEED an der University of Waterloo, Kanada zu sehen. Nicht zuletzt aufgrund der hier erzielten Ergebnisse war diese Kooperation besonders erfolgreich. Neben Konferenzbeiträgen ist hier auch eine größere Studie zur Umweltwirkung sogenannter „Open-Loop Supply Chains“ entstanden [s. Kalverkamp und Young, 2019]. In ihrer Studie untersuchen die Autoren den Begriff der „Closed-Loop Supply Chain“ (s. AP2) und kommen zu dem Schluss, dass aus Nachhaltigkeitssicht diese Supply Chains in Wissenschaft und Wirtschaft zu eingeschränkten Betrachtungen führt. Drei Fallbeispiele aus dem Bereich Automotive Remanufacturing wurden dazu anhand eines einfachen konzeptionellen Rahmens untersucht, welcher verschiedene Konzepte von „Loops“ (im Sinne von Kreisläufen) jeweils auf der Produkt-, Komponenten- und Materialebene betrachtet.

Anhand eines explorativen Forschungsansatzes mit Elementen der Grounded Theory wurden die Umweltauswirkungen von Supply-Chain-Kreisläufen untersucht. Anhand von drei exemplarischen Fällen wird auf jeder der drei Ebenen Produkt, Bauteil und Material untersucht, ob die vorherrschende „closed-Loop Supply Chain“ Betrachtung Lücken aufweist. Jeder Fall basiert auf Beobachtungen vor Ort und Fokusinterviews mit Vertretern der jeweiligen Unternehmen. Der Fall auf Produktebene stellt eine Ausnahme dar, da beim Remanufacturing in der Regel eine Komponente und nicht das gesamte Produkt zurückgeführt wird.

Die empirischen Daten stammen im Wesentlichen aus Interviews und Firmenbesuchen seit dem Jahr 2015 [u.a. referenziert in Kalverkamp, 2018; Kalverkamp et al., 2017; Kalverkamp und Raabe, 2017], für einen Fall wurden neue Daten genutzt. Es zeigte sich, dass geschlossene Lieferketten im Sinne einer Closed-Loop Supply Chain, die sich auf Hersteller-Aktivitäten konzentrieren, alternative Modelle von „reverse Supply Chains“ zu übersehen scheinen. Aufgrund unterschiedlicher, teilweise nur schwerlich vorhersehbarer Marktdynamiken und der (sich entwickelnden und verändernden) Beziehungen der

Marktakteure zueinander, können diese alternativen Kreisläufe zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen. Dann kommt es zu positiven Umweltwirkungen. Durch einen verhältnismäßig engen Fokus auf „geschlossene Kreisläufe“ („Closed-Loops“) in Forschung und Wirtschaft werden potenzielle Vorteile und Schwächen dieser Perspektive vereinfacht dargestellt und der Beitrag „offener Kreisläufe“ wird vernachlässigt. Eben diese „offenen Kreisläufe“ bilden sich durch (unabhängig agierende) Supply Chains. Zur besseren Differenzierung wird hier der Begriff der „Open-Loop Supply Chain“ geprägt (s. AP2). Diese Form der Supply Chain eröffnet neue Perspektiven auf Geschäftsinnovationen und zeigt, wie Produkt- und Materiallieferketten nachhaltiger werden können. Aufgrund dieser differenzierten Betrachtung der ökologischen Bewertung von Supply Chains lässt sich erkennen, dass eine ökologische Bewertung über das Produkt hinaus erfolgen muss. Die schlichte Annahme, dass eine „Closed-Loop Supply Chain“, die durch den Hersteller dominiert wird, quasi automatisch bessere Umweltwirkungen erzielt als unabhängige Akteure, die Kreisläufe aus vorwärts gerichteten Supply Chains etablieren, muss hinterfragt werden. In diesem Zusammenhang kommt Cascade Use in der Zusammenarbeit mit anderen Forschern zu dem Schluss, dass adaptivere Managementansätze für Reverse Supply Chains für Gebrauch- und Altprodukte erforderlich sind [vgl. Kalverkamp et al. 2017, 2018, Kalverkamp und Young, 2019].

Arbeitspaket 3: Entwicklung eines nachhaltigen Management Entscheidungstool

Ein zentrales Ziel in der Forschergruppe Cascade Use war die Entwicklung eines Informationsmodells über den Umwelteinfluss von gebrauchten Autoteilen durch den weiteren Nutzungsweg (Wiederverwenden des Bauteils oder Recycling der Materialien, siehe Abbildung 7). Das Modell soll dem Anwender bei seiner Entscheidung unterstützen, ob ein Bauteil weitergenutzt, repariert oder dem Recycling zugeführt werden soll. Wichtigster Indikator zur Entscheidungsunterstützung sind dabei die CO₂-Emissionen, die in Form einer Halbkreismatrix dargestellt werden (Voll: 100%, Halb: 50%). Aufgrund der unzureichenden Datenbasis verzichten wir hier auf absolute Zahlen. Basis für die Berechnung im Informationen haben lediglich den Fokus auf CO₂ Emissionen und Material- bzw. Energieeffizienz.

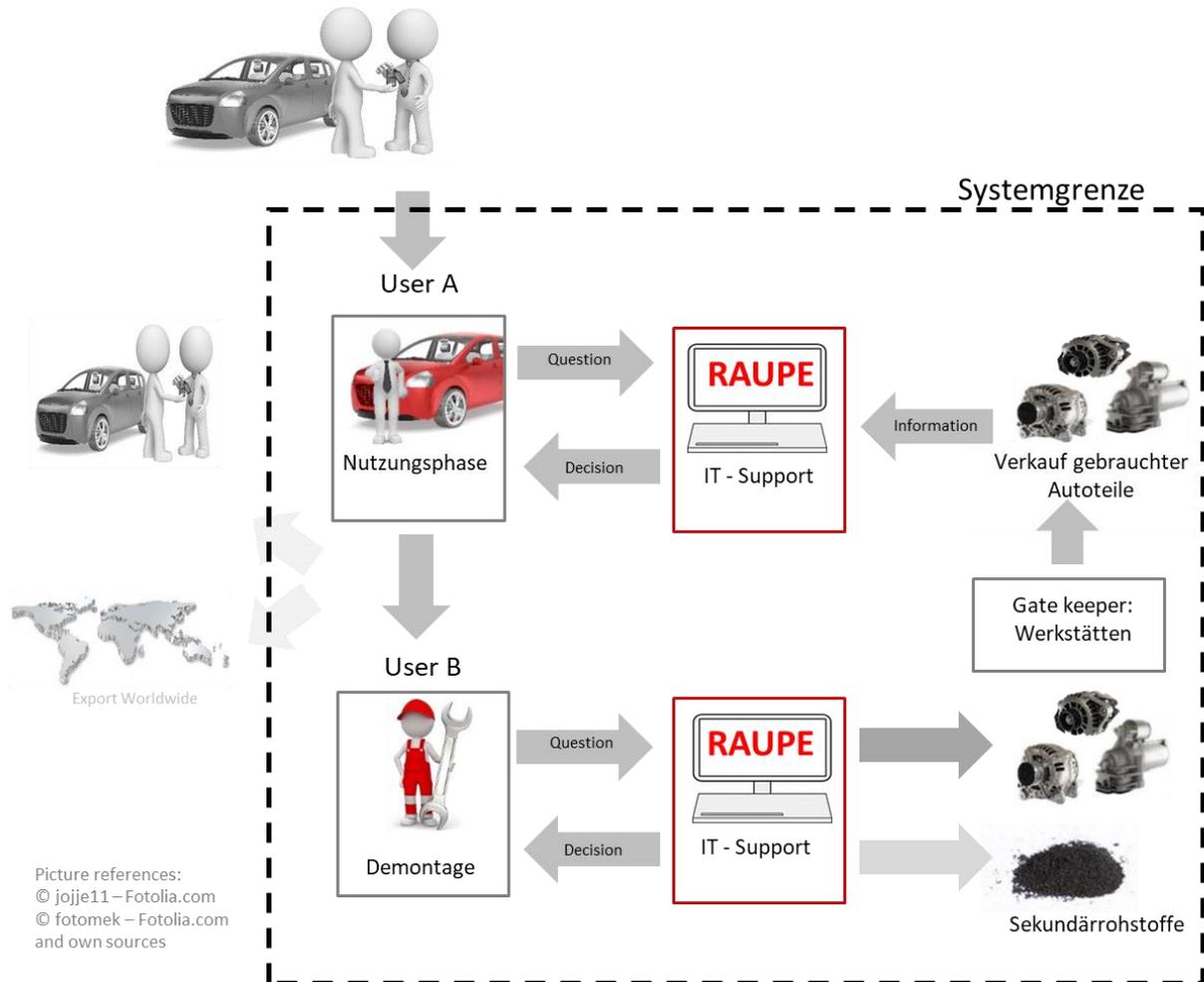


Abbildung 7 Konzept des Informationsmodells RAUPE [Pehlken, Kalverkamp, Koch, 2019]⁶

Das Entscheidungstool unterstützt die Kaskadenmethode im Automobilbereich und beinhaltet interaktive Daten aus einzelnen Autoteilen und lässt die in AP1 und AP2 gesammelten Informationen einfließen. Dieses Tool arbeitet auch herstellerunabhängig (keine Unterscheidung eines VW, Audi, Volvo, Mazda, etc.) und soll generell Komponenten bzw. Materialien aus dem Auto (Lichtmaschine, Elektromotor, bzw. Kupfer, Stahl, etc.) erfassen. Vorrangig wurde das Entscheidungstool für alle Anwender entwickelt, die ihre eigenen Nachhaltigkeitsziele mit Fokus auf CO₂ Emissionen und Material- bzw. Energieeffizienz erreichen bzw. messbar machen wollen. Wann emittiert zum Beispiel ein altes Auto durch die Nutzungsphase mehr CO₂ in die Umwelt als ein neues Auto auf dem aktuellen Stand der Technik. Oder welche Bauteile erhält man so gut wie neu als instandgesetzte Teile für seine Autoreparatur? Auf verschiedenen Ebenen werden wir daher agieren. Ebenso kann unser Werkzeug Behörden- und Entscheidungsträgern dienlich sein, um umweltfreundlichere Varianten zu fördern.

⁶ Online verfügbar unter <https://www.springer.com/de/book/9783662578858>

Zentrales Ergebnis der Forschungsarbeiten ist daher in AP3 das Tool mit Namen RAUPE (**R**ecycling of **A**utomotive Units and **P**arts **E**valuator)⁷ zur Entscheidungsunterstützung für Werkstätten, Endverbraucher und Demontagebetriebe. Das webbasierte Tool vergleicht eingesetzte Rohstoffe verschiedener Pkw-Ersatzteile sowie deren CO₂-Emissionen bzw. -Einsparungen bei Lebensdauererlängerung im Vergleich zum Neuteil. Die Webapplikation kann dem Anwender Empfehlungen geben, ob ein Bauteil wiedergenutzt, repariert oder dem Recycling zugeführt werden sollte. Dem Demontagebetrieb gibt sie Hinweise, welche Bauteile mit wirtschaftlichen Erlösen der Wiedernutzung zugeführt werden können. Einzelteile eines Pkws unterliegen einem zeitlich unterschiedlichen Verschleißprozess, d.h. zum Zeitpunkt der Demontage eines Fahrzeuges können einige Teile noch vollkommen intakt sein und könnten problemlos wiederverwendet werden (Reuse). Die Verlängerung des Lebenszyklus der Einzelteile eines Pkw (bis zu einem gewissen Zeitpunkt) kann zur Senkung der CO₂-Emissionen beitragen, da die Reparatur von Fahrzeugen mit noch intakten Teilen oder instandgesetzten Ersatzteilen erheblich Ressourcen (z.B. Stahl, Aluminium, kritische Rohstoffe etc.) einspart. Bei der Autoherstellung nehmen die Stahl- und Eisenwerkstoffe mit knapp 2/3 der Masse den größten Materialanteil ein. Bei einem Durchschnittsgewicht eines Mittelklassewagens von 1500 kg entspricht das 933 kg. Der Aluminiumanteil liegt bei ca. 140-150 kg. Die aktuell steigenden Kosten sind zum Teil auf den hohen Anteil kritischer Rohstoffe zurückzuführen, die oft nur als sogenannte Gewürzmetalle in kleinen Mengen vorhanden sind. Gold als Konfliktmineral kommt dazu noch eine besondere Bedeutung zu. Durch die Wiederverwendung der Bauteile werden keine weiteren Konflikt- oder kritischen Rohstoffe benötigt wodurch die Wertschöpfungskette inkl. der Kosten stabil bleibt.

Mit RAUPE wird erstmalig für den deutschen Gebrauchtautoteilemarkt eine digitale Entscheidungsunterstützung für Gebrauchtfahrzeuge und deren Ersatzteilmanagement entwickelt, die unabhängig von den Automobilherstellern ist. Demontagebetrieben kommt bei unserem Ansatz eine bedeutende Rolle in der Kreislaufwirtschaft zu, da sie wesentliche Entscheidungen über Reuse und Recycling treffen. RAUPE fördert die Kaskadennutzung im Automobilbereich und beinhaltet zahlreiche Informationen aus einzelnen Autoteilen. RAUPE stellt zum Ende der Laufzeit von Cascade Use einen Prototyp dar.

Momentan greift RAUPE auf eine aktuelle Datenbank des Callparts Netzwerkes zurück, welche aus ca. 2 Millionen einzelnen Autogebrauchtteilen und deren Informationen besteht. Diese werden durch data mining Methoden ausgewertet und dem Nutzer verständlich visualisiert. Damit können Rückschlüsse auf die Komponenten, deren Materialinhalte und Rohstoffpreise gezogen werden. Dieses Tool arbeitet herstellerunabhängig (keine Unterscheidung eines VW, Audi, Volvo, Mazda, etc.) und erfasst generell Komponenten bzw. Materialien aus dem Auto (Lichtmaschine, Elektromotor, bzw. Kupfer, Stahl, etc.). Die Ersatzteile der Datenbank entsprechen dem Durchschnitt der in Deutschland durch die Callparts Partner demontierten Autoteile der letzten 10 Jahre und enthält nahezu jede Automarke, die in Deutschland verwertet wird. RAUPE genießt daher den Vorteil, dass markenunabhängig Autoteile erfasst und auf ihre Umwelt- und Rohstoffbilanz bewertet werden

⁷ Vgl Publikation Pehlken, Kalverkamp, Koch 2019

können. Auf diese Weise wird für die Umweltbewertung z. B. ein „Durchschnitt über markenunabhängige Autoteile“ möglich. Da RAUPE "user generated content" zulässt, ist RAUPE so konzipiert, dass es mit der Zeit "lernt" da jeder Nutzer neue Daten eingeben kann und somit das Tool im Lauf der Nutzungsphase genauer und zuverlässiger wird. Nicht funktionale Bauteile werden nach Reklamation von dem Fachbetrieb gegen Garantie (1 Jahr) ausgetauscht.

Die Webapplikation RAUPE wurde für zwei Zielgruppen entwickelt:

- a) Endverbraucher und
- b) Demontagebetriebe.

In der Zielgruppe der Endverbraucher können einerseits nachhaltigkeitsaffine als auch andererseits kostenbewusste Kunden über das Tool angesprochen werden. RAUPE beantwortet zum Beispiel neben dem Kostenvorteil auch die Frage, bis zu welchem Zeitpunkt ein bereits genutztes Fahrzeug weniger CO₂ durch die Verlängerung der Nutzungsphase emittiert als ein Neuwagen auf dem aktuellen Stand der Technik durch die Produktion. RAUPE soll allerdings auch aufzeigen, wann ein Neuprodukt umweltfreundlicher ist (durch Technikvorsprung). Der Bedarf aus Sicht des Endverbrauchers kann zum Zeitpunkt des Projektabschlusses von Cascade Use nicht eingeschätzt werden und steht noch aus. Die Akzeptanz des Endverbrauchers wurde bisher nicht betrachtet, wird aber für Folgeprojekte berücksichtigt und als sehr bedeutend für den Erfolg angesehen.

RAUPE unterstützt darüber hinaus die Zielgruppe der Demontagebetriebe (ca. 1.200 in D). Die Webapplikation schafft Transparenz über Angebot und Nachfrage auf dem Ersatzteilmarkt und erleichtert daher die Auswahl von erlösträchtigen Fahrzeugteilen. Demontagebetrieben kommt eine bedeutende Rolle in der Kreislaufwirtschaft zu, da sie wesentliche Entscheidungen über Reuse und Recycling treffen. Bei der Fahrzeugdemontage wird entschieden, ob Bauteile überhaupt demontiert werden (zusätzlich zu den gesetzlichen Vorgaben) und ob diese Bauteile und Komponenten direkt vermarktet und ggf. eingelagert werden, oder der Refabrikation zugeführt bzw. als besser sortierter Altschrott ins Materialrecycling gehen werden.

Meilenstein 4: Entscheidungstool [RAUPE]

Der Meilenstein „Entscheidungstool“ wird in verschiedene Aspekte unterteilt. Er stellt einen von zwei Meilensteinen im AP3 dar und umfasst inhaltlich den größten Teil dieses APs. Ein Ziel und Meilenstein in der Forschergruppe Cascade Use ist daher die Entwicklung eines Informationsmodells über den Umwelteinfluss von gebrauchten Autoteilen durch den weiteren Nutzungsweg.

Nach Abschluss der Konzepterstellung des Entscheidungstools mit Namen „RAUPE“ wurde die Architektur entwickelt. Das Tool nutzt einen bottom-up Ansatz, da (Schredder) Daten aus Recycling- und Demontagebetrieben den Kern des Datenmodells darstellen. Diese Daten lassen Rückschlüsse auf die einzelnen Fahrzeugkomponenten zu, womit wiederum Rückschlüsse auf das Fahrzeug selbst möglich sind. Auf der Materialebene wurden beispielsweise Kritikalitätsbewertungen der Rohstoffe integriert.

Im Detail besteht der Aufbau des Entscheidungstools aus jeweils zwei Lagen verteilt über die drei Komponenten Auto, Autoteil und Material: die erste Lage a) behandelt die Berichterstattung als Report, und die zweite Lage b) umfasst die Datenebene.

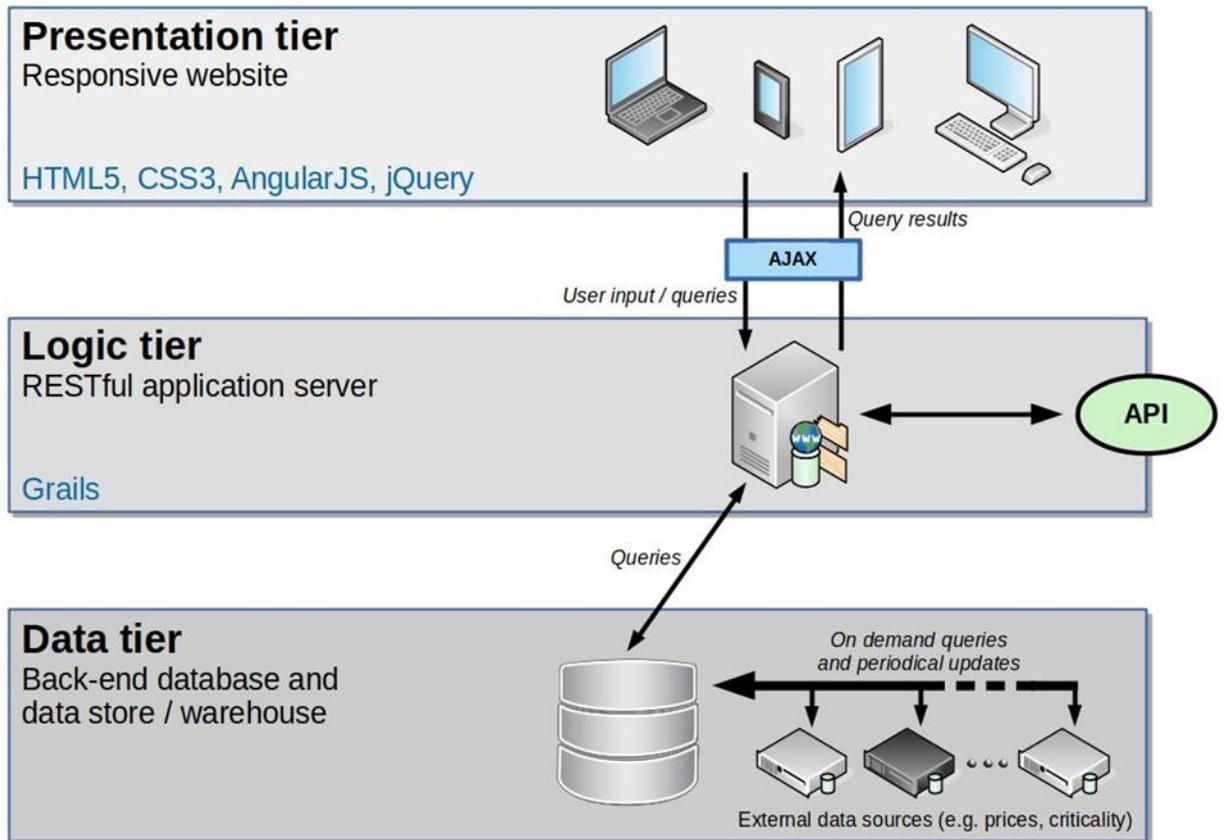


Abbildung 8: Architektur des Entscheidungstools „Raupe“ [Pehlken, Kalverkamp, Koch 2019]⁸

RAUPE dient zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses am Lebenszyklusende eines Autos (d.h. spätestens dann, wenn ein Auto verschrottet wird) und repräsentiert ein Informationsmodell bzw. eine IT-gestützte Plattform für beteiligte Akteure. Dieses Entscheidungstool unterstützt die Kaskadenmethode im Automobilbereich und beinhaltet interaktive Daten aus einzelnen Autoteilen. Nicht alle Einzelteile eines Autos sind zum gleichen Zeitpunkt nicht mehr funktional, da Teile verschleifen oder z.B. eine Unfallreparatur erforderlich wird. Ebenso sind Teile noch vollkommen intakt zu dem Zeitpunkt, an dem ein Fahrzeug zur Demontage gelangt. Es geht daher darum zu entscheiden, welche Autoteile wiederverwendet (reuse) werden können und welche nicht. Im Fokus der Entwicklung stehen zwei Anwendergruppen, zum einen die Endverbraucher, die ihre eigenen Nachhaltigkeitsziele erreichen bzw. messbar machen wollen, z.B. mit der Frage „Wann emittiert ein

⁸ Online verfügbar unter <https://www.springer.com/de/book/9783662578858>

altes Auto durch die Nutzungsphase mehr CO₂ in die Umwelt als ein neues Auto auf dem aktuellen Stand der Technik, oder Welche Bauteile erhält man so gut wie neu als instandgesetzte Teile für eine Autoreparatur? “ Diese Fragestellungen können auch Behörden und Entscheidungsträgern dienlich sein, um umweltfreundlichere Varianten zu fördern. Als zweite Anwendergruppe stehen die Demontagebetriebe im Fokus, die wesentliche Entscheidungen über Reuse und Recycling treffen. Bei der Fahrzeugdemontage wird entschieden, ob Bauteile überhaupt demontiert werden (zusätzlich zu den gesetzlichen Vorgaben) und ob diese Bauteile und Komponenten direkt vermarktet und ggf. eingelagert werden, oder der Refabrikation zugeführt werden, oder als besser sortierter Altschrott ins Materialrecycling geht. Zusätzlich zu den oben genannten Gruppen der Verbraucher und Demontagebetriebe sowie der Behörden und politischen Entscheidungsträgern gilt es außerdem die Materialrecycler (Schredderbetriebe und Sekundärrohstoffhersteller) zu berücksichtigen.

Die größte Herausforderung in diesem Tool ist die Verfügbarkeit der relevanten Daten. Automobilhersteller nutzen ihre eigenen Materialdatenbanken, aber teilen sie nicht mit Außenstehenden aufgrund der Konkurrenzsituation auf dem Markt. Daher werden in dem hier entwickelten „öffentlichen“ Entscheidungstool ausschließlich öffentlich verfügbare Datenbanken verwendet, so dass anschließend jeder Anwender ein Open-Access-Tool nutzen kann. Eine Einschränkung bei dieser Vorgehensweise ist die damit verbundene Unsicherheit, allerdings hat dies den Vorteil, dass markenunabhängig Autoteile erfasst und bewertet werden können. Auf diese Weise wird für die Umweltbewertung z. B. ein „Durchschnitt über markenunabhängige Autoteile“ möglich. Die für das Entscheidungsinstrument identifizierte Architektur ist ein "dreistufiges" Architekturdesign, das eine Abstraktion von drei Kernaspekten des Entscheidungsinstruments unterstützt, nämlich: a) die visuelle Schnittstelle, die den Nutzern über eine interaktive Web- oder mobile Anwendung zur Verfügung steht, b) die Entscheidungslogikschicht, die eine intelligente Verbindung und Aggregation von Daten zur Verbindung mit der Schnittstelle bietet und schließlich c) eine Datenzugriffsschicht, die die Datenbank oder das Data Warehouse mit den verbleibenden Ebenen verbindet. Das Entscheidungsinstrument wird RAUPE genannt, als Akronym für „**R**ecycling of **A**utomotive **U**nits and **P**arts **E**valuator“.

Meilenstein 5: Überprüfung des Entscheidungsinstruments und Visualisierung

Die Benutzeroberfläche als visuelle Schnittstelle wird als letzte Ebene implementiert, um Benutzern die Möglichkeit zu geben, Abfragen von einer PHP-basierten Website oder einer mobilen Anwendung auszuführen. Durch die Trennung dieser Schicht von den anderen können alternative Schnittstellen entwickelt werden, wie z. B. andere verfügbare Open-Access-Tools, die einen Mehrwert erhoffen lassen, wie die OpenLCA Anwendung der GreenDelta GmbH. Eine weitere Komponente der Schnittstellenschicht ist die Auswahl von Präsentationsoptionen von Datenberichten mit relevanten Indikatoren. Eine wesentliche Aufgabe besteht darin, relevante Indikatoren für das Fahrzeugrecycling zu identifizieren, die den Stakeholder-Nutzergruppen relevante und nützliche Informationen zeigen.

gebraucht 58,25 EUR (64% Preisersparnis) vs. **neu 91,50 EUR**

Einsparpotenzial für das ausgewählte Bauteil:
 - CO₂-Ersparnis: 78 %
 - Material-Ersparnis: 68 %

Einsparpotenzial deines Warenkorb:
 - CO₂-Ersparnis: +18%
 - Material-Ersparnis in kg: +87%

Materialien

Bauteil	Material	Gewicht (kg)	Ersatzwahrscheinlichkeit (%)
Rotor	Kupfer	0,550	22
Kühler	Stahl	0,138	10
Kugellager	Gewalzter Stahl	0,099	50

Abbildung 9: Screenshot von RAUPE am Beispiel einer Lichtmaschine (eigene Darstellung)

Die Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen jeweils Screenshots von der Webapplikation RAUPE. Auf der linken Seite ist das vom Kunden ausgewählte Bauteil (hier Lichtmaschine) in drei Ansichten inkl. der technischen Daten dargestellt. Auf der rechten Seite sind in Abbildung 9 die Einsparungen im Halbkreis zu sehen: zum einen die Einsparungen in Form von CO₂, die sich bei den meisten Autoteilen durch die Vermeidung der Produktion neuer Bauteile ergibt, und zum anderen die gleichzeitige Kostenersparnis im Vergleich zu einem Neuteil. Als zusätzliche Info sind die enthaltenen Materialien (im Durchschnitt) dargestellt. In Abbildung 10 sieht man beim runterscrollen noch die enthaltenen kritischen Rohstoffe, die vermutlich eher für den Demontagebetrieb von Interesse sind und bei der Entscheidung helfen ob der Materialwert evtl. den Produktwert übersteigt.

Zum erfolgreichen Abschluss der Forschergruppe Cascade Use wurde das Forschungsergebnis RAUPE vom BMWi ausgezeichnet. Am 31. Januar 2019 verlieh Oliver Wittke, Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi), den Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2018 an drei mittelständische Unternehmen und eine einzige Forschungseinrichtung: Cascade Use von der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis zeichnet das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie herausragende Beispiele rohstoff- und



materialeffizienter Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen sowie anwendungsorientierte Forschungsergebnisse aus.

Durch die Auszeichnung mit dem Deutschen Rohstoffeffizienzpreis 2018 ist RAUPE und seine Anwendung exzellent im Video dargestellt:

<https://www.youtube.com/watch?v=bLW0n4RKleg&index=6&list=PLn2cxyDRC0H1EpkZxfBTtoaVa57MjlbzL&t=0s>

The screenshot shows the RAUPE website interface. On the left, there's a product page for a 'Lichtmaschine (gebraucht)' (used light machine) with a price of 58,25 EUR. The main dashboard displays two gauges: 'CO2-Einsparnis' at 78% and 'Material-Einsparnis' at 68%. Below these, it shows a 'Einsparpotenzial deines Warenkorbs' (savings potential of your cart) with '+18%' for CO2 and '+87%' for material. A periodic table at the bottom, titled 'Kritische Elemente' (Critical Elements), highlights various elements in red and orange, indicating their critical status. A legend below the table defines categories like 'Critical', 'Candidate', 'Alkali metal', etc.

Übersicht über die kritischen Rohstoffe. Relevante Rohstoffe werden markiert.

Abbildung 10: Screenshot von RAUPE mit Darstellung der kritischen Rohstoffe (eigene Darstellung)

Besondere Ergebnisse und Leistungen

Dieser Abschnitt ergänzt abschließend besondere Ergebnisse und Leistungen, die die Gruppe oder einzelner ihrer Mitglieder erreicht haben und die den Erfolg der Gruppe verdeutlichen.

Der Doktorand Herr Matthias Kalverkamp wurde 2016 durch die Heinz Neumüller Stiftung mit einem Stipendium ausgezeichnet. Die Heinz Neumüller Stiftung wurde vom gleichnamigen Gründer des Oldenburger Unternehmens CEWE Stiftung ins Leben gerufen und fördert Promotionsstudenten, die sich „durch Können, Initiative und Verantwortung“ ausgewiesen haben. Seine Promotion an der Carl von Ossietzky University schloss er 2018 in den Wirtschaftswissenschaften mit Auszeichnung (summa cum laude) ab.

Als populärwissenschaftliches Highlight der NWG Cascade Use kann die „Broschüre“ gelten, die zum Projektabschluss in einer aktualisierten und erweiterten Auflage erscheint (auf Deutsch). Die erste Version der Broschüre wurde im Jahr 2017 veröffentlicht und war auf Deutsch sowie Englisch verfügbar. Besondere Merkmale der Broschüre sind deren für Laien aufbereiteter Inhalt, der durch alle Mitarbeiter von Cascade Use gemeinsam erarbeitet wurde und somit jeder auch einen persönlichen inhaltlichen Beitrag geliefert hat: <https://tempro.uni-oldenburg.de/ccu-brochure/de/>

Wie schon im Meilenstein 5 beschrieben, wurde das Forschungsergebnis RAUPE vom BMWi mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2018 ausgezeichnet. Durch die Auszeichnung mit dem Deutschen Rohstoffeffizienzpreis 2018 ist RAUPE und die Arbeit von Cascade Use exzellent im Video dargestellt: <https://www.youtube.com/watch?v=bLW0n4RKleg&index=6&list=PLn2cxyDRC0H1EpkZxfBTtoaVa57MjlbzL&t=0s>

Cascade Use Leiterin Dr.-Ing. Alexandra Pehlken wurde neben anderen NachwuchsgruppenleiterInnen von FONA als „Köpfe der Zukunft“ ausgezeichnet, was eine sehr schöne Bestätigung der eigenen Arbeit war. Aber auch mitarbeitende Studierende gingen nicht ohne Preise nach Hause. So wurden von Cascade Use betreute Studentenarbeiten mit folgenden Preisen ausgezeichnet:

- ✓ Rikka Wittstock: Studienpreis der VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU) für die Masterarbeit mit dem Titel: "Resource Constraints for the Diffusion of Fuel Cell Vehicles: Assessing the Role of Recycling in Meeting Future Platinum Demand"
- ✓ Kalle Wulff: Förderpreis der Peter-Wefing-Stiftung 2017 für die Bachelorarbeit "Entwicklung einer ökobilanziellen Bewertungsmethode von Kaskadennutzungen am Beispiel von Rotorblättern aus Windkraftanlagen"
- ✓ Merle Heyken: Studienpreis für Mittelstandsforschung 2018/2019 für die Masterarbeit „Zukunftsperspektiven für Biogasanlagen – Zwischen Klimaschutzpotentialen und politischen Rahmenbedingungen“
- ✓ Björn Koch und Sebastian Tiemann: "Research Grant for raw material criticality" des International Round Table on Critical Materials (IRTC) in Tokio, 2018

Einsatz für die junge Generation

Im Rahmen der Arbeit von Cascade Use legten wir auch einen Fokus auf eine Aufklärungsarbeit und Wissensvermittlung an künftige Generationen. Somit war Frau Dr. Pehlken über die Forschungsbörse beim Windhorst Gymnasium in Meppen zum Thema Elektromobilität beim Wissenschaftstag einige Male aktiv und bearbeitete mit Schülern der 12. Klasse ein Thema zur Elektromobilität. Aber auch andere Schulen nutzten das Angebot der Forschungsbörse und die regionale Zeitung NWZ berichtete darüber.

Als übergeordnetes Ziel unserer Arbeit stand in Kombination mit der CO₂-Einsparung die langfristige Rohstoffsicherung. Denn insbesondere unsere Kinder und Enkelkinder betrifft die Thematik, da sie mit den immer weniger werdenden Ressourcen weiterhin auskommen müssen. Aus diesem Grund hat Cascade Use unterschiedliche Methoden genutzt, um Kindern spielerisch die Bedeutung von Kaskadennutzung zu vermitteln.



Abbildung 11: Scrapy Bird im Playstore verfügbar

Neben der gemeinsam mit dem Steinbeis Transferzentrum Ressource entwickelte kostenfreie Spieleapp „Scrapy Bird“ (die insbesondere über die CO₂ Einsparung durch Recycling aufklärt) und im Playstore veröffentlicht ist, sowie entsprechenden auf die Zielgruppe gestalteten Plakaten ist zum Ende der Laufzeit von Cascade Use auch das Kinderbuch „**Luise rettet die Welt**“ gedruckt und veröffentlicht.

Das Kinderbuch erzählt die Geschichte von Luise (8), der die Auswirkungen von zunehmendem Müll und Abgasen sowie die damit verbundenen Konsequenzen bewusst werden. Luise beschließt daraufhin die Welt zu retten und sammelt dafür am Arbeitsplatz ihrer Mutter großartige Ideen die sie im Laufe des Buches mit Nachbarn, Freunden, Lehrern und Familie umsetzt. Luise zeigt auf, dass jedes Kind wichtig ist und jeder einzelne - unabhängig des Alters – Verantwortung trägt unseren Konsum nachhaltiger zu gestalten, um somit Rohstoffe für die eigene als auch nachfolgende Generationen zu erhalten. Das Buch „**Luise rettet die Welt**“ wurde mit Mitteln des BMBF als Hard- und Softcover Heft gedruckt und an interessierte Bürgerinnen und Bürger kostenfrei verteilt.



Abbildung 12: Auszug aus Luise rettet die Welt – Teil 1

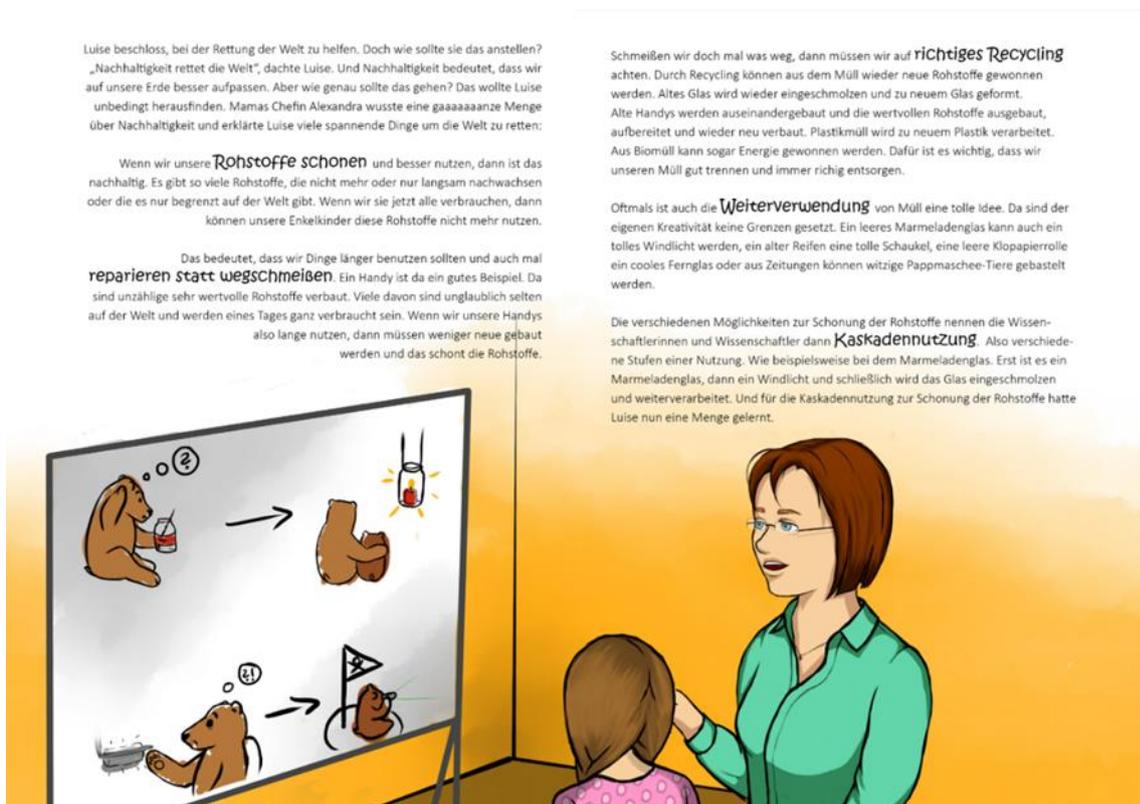


Abbildung 13: Auszug aus Luise rettet die Welt – Teil 2

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten in der Nachwuchsforschergruppe waren notwendig und alle Arbeiten waren angemessen. Da auch die wissenschaftliche Qualifizierung im Vordergrund des Förderprogrammes standen, wäre die sehr erfolgreiche Dissertation von Dr. Matthias Kalverkamp ohne diese Förderung nicht möglich gewesen. Aufgrund des langen Förderzeitraumes von insgesamt 5,5 Jahren waren einige Umwidmungen notwendig, vor allem da zwei Bundeswahlen die Laufzeit und Finanzierung der Arbeitsgruppe vor nicht vorhersehbare Schwierigkeiten darstellte. Dies wurde mit Unterstützung der Universität Oldenburg und des Projektträgers DLR erfolgreich gelöst. Dennoch führte dies dazu, dass einer der Doktoranden nach 3 Jahren lieber in die Industrie wechselte und so eine neue Lösung geschaffen werden musste.

Am Ende war Cascade Use auf wissenschaftlicher Ebene mit der Auszeichnung des Rohstoffeffizienzpreises und auf persönlicher Qualifizierungsebene (Auszeichnung als FONA „Köpfe der Zukunft“) ein großer Erfolg.

Dies wäre ohne Fördermittel des BMBF nicht möglich gewesen.

3. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Zentrum der langfristigen Anwendungsorientierung der NWG stand die Entwicklung des Tools RAUPE. In die Entwicklung dieses Tools sind Erkenntnisse aus der Forschung der NWG insgesamt sowie aus den Arbeiten der einzelnen Mitglieder eingeflossen (z.B. im Rahmen der Promotion von Matthias Kalverkamp).

Das Tool RAUPE ist modular aufgebaut, so dass einzelnen Funktionen auch unabhängig vom Tool genutzt werden können (z.B. in Form eines Web-Services). Zu diesen Funktionen gehören insbesondere das Data Mining, welches für die Unterstützung der Vermarktung von Altteilen entwickelt wurde. Der modulare Aufbau des Tools fördert das Potential zur Weiternutzung und somit zur Verwertbarkeit der Ergebnisse im praktischen Sinne. Es ist beabsichtigt den Prototyp RAUPE in weiteren Forschungsvorhaben weiterzuentwickeln und anwendungsreif zu gestalten. Es werden aktuell keine Ergebnisse aus Cascade Use wirtschaftlich vermarktet.

Im Sinne der wissenschaftlichen Verwertbarkeit wurden wichtige Beiträge zu Diskussionen über die Circular Economy in betriebswirtschaftlichen sowie umweltökologischen Communities bereitgestellt. Zusätzlich zum anwendungsorientierten Schwerpunkt dieser Arbeiten sind aus der Promotion von Herrn Kalverkamp auch Beiträge mit eher theoretischem Zugang entstanden. Somit hat die NWG zur wissenschaftlichen Diskussion sowohl theoretisch als auch anwendungsorientiert beigetragen. Durch die Veröffentlichung der Arbeiten ist die Grundlage geschaffen, dass nicht nur die NWG-Mitglieder und Kooperationspartner die Ergebnisse nutzen können, sondern auch weitere Wissenschaftler darauf zurückgreifen können.

4. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen der Arbeit der Nachwuchsgruppe wurden regelmäßig Gespräche mit Fachleuten aus dem Bereich Autoverwertung und Alt-/Gebrauchtteilehandel geführt. Diese Gespräche zeigten im Wesentlichen zwei Aspekte auf. Zum einen besteht ein großes Interesse an der Verbesserung der Gebrauchtteilevermarktung. Dabei wurde auch deutlich, dass es ein grundsätzliches Bestreben gibt, anhand von Data Mining und anderen Datenanalyseverfahren die Demontageentscheidung und damit eben auch die Vermarktung zu optimieren. Dies liegt auch daran, dass es einen Anstieg beim Online-Handel mit Gebrauchtteilen gibt. Allerdings sind diese Ansätze bisher nicht „marktreif“. Hierzu leistet die NWG Cascade Use mit dem Tool RAUPE einen wichtigen Beitrag, wie entsprechend bekundetes Interesse zeigt.

Zum anderen wurde deutlich, dass es in Japan bereits seit einigen Jahren Anstrengungen unternommen werden, um den CO₂-Fußabdruck von Gebrauchtteilen zu ermitteln und als Verkaufsargument zu nutzen. In Kanada wurde die NWG Cascade Use darauf aufmerksam gemacht, dass es Interesse der Recyclingwirtschaft an Verfahren zur Ermittlung der CO₂-Einsparung gibt. Die Gründe dafür liegen im gestiegenen politischen Interesse an der Kreislaufwirtschaft und Erwägungen dazu auch regulatorisch einzugreifen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung lag im Bereich des Remanufacturing (im weiteren Sinne Teil der Wiederverwendung; auch als „Refabrikation“ bekannt). Das Remanufacturing im Automobilbereich ist permanent Verfügbarkeitsproblemen ausgesetzt, da sich die Beschaffung von Alt- oder Gebrauchtteilen nicht wie in der klassischen Neuproduktion planen lässt. Unterschiedliche Akteure aus Wirtschaft und Forschung versuchen deshalb Lösungen für dieses Versorgungsproblem zu finden. Während der Laufzeit der Nachwuchsgruppe sind hier keine Verfahren oder Methoden bekannt geworden, die diese Probleme in der Realität abschließend lösen können. Allerdings gibt es Geschäftsmodelle und Logistiklösungen, die Achtungserfolge erzielen (s. Circular Economy Solutions GmbH). Dabei werden allerdings die Folgen für den Gesamtmarkt und auch die tatsächlichen Umweltkosten nicht berücksichtigt. Dies konnte die Nachwuchsgruppe unabhängig vom vorgenannten Beispiel grundsätzlich darlegen [Kalverkamp, Raabe 2017]. Weiterhin zeigte eine vergleichende Studie [Kalverkamp 2018], dass durch die Nutzung digitaler Technologien im Handel mit Alt-/Gebrauchtteilen (die für das Remanufacturing bestimmt sind) zumindest für die Demontagebetriebe höhere Absatzmengen in entsprechende Kanäle erzielen lassen. Anhand des Beispiels aus Nordamerika wird deutlich, dass dortige Akteure bereits erste Fortschritte auf dem Weg der Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft vorzuweisen haben. Dies zeigt, dass der Ansatz der NWG Cascade Use vielversprechend ist und entsprechende Überlegungen sind auch in die Entwicklung des RAUPE-Tools eingeflossen. Die Lösungen aus Nordamerika sind nicht ohne weiteres auf Deutschland oder Europa übertragbar, weshalb hier die Arbeit von Cascade Use wichtig war.

Neben diesen Entwicklungen forschen auch andere Wissenschaftler an Themen wie der Altteilerückgewinnung, den Kreislaufschritten Reuse, Refurbish, Remanufacture und Recycling. Die

Arbeit der NWG Cascade Use ist jedoch nicht eine bloße Fortsetzung entsprechender Forschungen unter dem Schlagwort „Circular Economy“, sondern besticht durch die Verknüpfung von Erkenntnissen und Methoden aus unterschiedlichen Bereichen (Umweltwissenschaften, Ingenieurwesen und Betriebswirtschaft). Dadurch hat sie neue Erkenntnisse entwickelt und zu wichtigen Diskussionen in den einzelnen Fach-Communities beigetragen.

Weitere wichtige Projekte auf Ebene der Rohstoffverfügbarkeit wurden vor allem durch das EU finanzierte Projekt **ProSUM** „Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes“, welches im Jahre 2017 auslief.

Durch die Bestrebungen der EU die Datenverfügbarkeit zu verbessern, konnte Cascade Use sehr von der ab 2017 aufgebauten Datenbank RMIS „Raw Materials Information System“ (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>) profitieren.

Auch das Umweltbundesamt befasste sich stark mit dem Thema Altfahrzeuge und veröffentlichte während der Laufzeit von Cascade Use einige Berichte zu dem Thema, die auf der Webseite des UBA erreichbar sind:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/altfahrzeuge#altfahrzeuge-in-deutschland>

Internationale Kontakte waren sehr wichtig für die Forschergruppe Cascade Use und neben der im Schlussbericht intensiven Netzwerke nach Kanada und China wurden Kontakte in das Netzwerk des „IRTC International Round Table on Materials Criticality“ (<https://irtc.info/>) gepflegt.

Natürlich kam der Forschergruppe im Rahmen der letzten Jahre sehr die Gesetzgebung entgegen: angefangen von der ELV Directive über die EU Circular Economy Strategie bis letztlich zum „Green Deal“ der Europäischen Kommission. Die führt nach sich, dass unzählige weitere Forschungsprojekte in den letzten Jahren entstanden, die sich hier kaum aufzählen lassen.

5. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

- Pehlken, A., Kaerger, W., Ming Chen, Müller, D.H. (2014); The necessity of recycling networks for the sustainable usage of automotive parts – case study Germany and PR China, in: Environmental Issues in Automotive Industry - design, production and end-of-life phase, Springer, 2014, http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23837-6_9
- Pehlken, A., Decker, A., Rolbiecki, M., Thoben, K.D. (2014), Assessing the future potential of waste flows – case study scrap tires; **International Journal of Sustainable Development and Planning**, Vol 9 Issue 1, pp. 90-105, WIT Press, 2014, <http://journals.witpress.com/journals.asp?iID=100#papers>
- Kalverkamp, Matthias (2015): Supply For Remanufacturing. Contradictions Between Theory and Practice. In: K. S. Pawar, H. Rogers und E. Ferrari (Hg.): The Proceedings of 20th International Symposium on Logistics (ISL 2015). Reflections on Supply Chain Research and Practice. Bologna, Italy, 5-8 July 2015, S. 251–260.
- Burger, Clayton; Pehlken, Alexandra; Kalverkamp, Matthias (2015): Decision making challenges and software solutions in automotive recycling. An Overview. Global Cleaner Production and Sustainable Consumption Conference, 1-4 November 2015. Sitges, Barcelona, Spain.
- Kalverkamp, Matthias; Pehlken, Alexandra (2015): Support for Improved Scrap Tire Re-use and Recycling Decisions. In: Brenda Scholtz, Jorge Marx Gómez und Clayton Burger (Hg.): 2015 Proceedings of the 7th Information Technologies in Environmental Engineering International Conference, S. 42–54.
- Pehlken, Alexandra; Kalverkamp, Matthias (2015): Kaskadennutzung im Automobil - Realität oder Zukunftsmusik? In: Thomé-Kozmiensky, Goldmann, Daniel (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kosmiensky; TK (Recycling und Rohstoffe, 8), S. 173–182.
- Li, Zh., Pehlken, A., Qian, H., Hong; Zh. (2015), "A systematic adaptable platform architecture design methodology for early product development," **Journal of Engineering Design**, 2015, <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09544828.2015.1112366>
- Wittstock, R., Pehlken, A., Wark, M. (2016); Challenges in automotive fuel cells recycling, **Journal Recycling** 2016 (1), pp 343-364, doi:10.3390/recycling1030343, MDPI AG, Switzerland, 2016
- Gomez, J.C., Pehlken, A., (2017): Resource Availability in Photovoltaics– Case Study: Tellurium; 15th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece, September 2017, available online: https://cest.gnest.org/sites/default/files/presentation_file_list/cest2017_01063_oral_paper.pdf
- Kalverkamp, Matthias; Raabe, Thorsten (2017): Automotive Remanufacturing in the Circular Economy in Europe. Marketing System Challenges. In: **Journal of Macromarketing** 38 (1), S. 112–130. DOI: 10.1177/0276146717739066.
- Kalverkamp, Matthias (2017): Supplier Relationship Management in a Circular Economy. Core Brokers in Automotive remanufacturing. In: K. S. Pawar, A. Potter und A. Lisec (Hg.): Proceedings of the 22nd International Symposium on Logistics (ISL 2017). Data Driven Supply Chains. Ljubljana, Slovenia, 9-12th July 2017. Nottingham: Nottingham University

- Business School, S. 654–662. Online verfügbar unter http://www.isl21.org/wp-content/uploads/2017/07/ISL_2017_Full_Papers.pdf.
- Kalverkamp, Matthias; Pehlken, Alexandra; Wuest, Thorsten (2017): Cascade Use and the Management of Product Lifecycles. In: **Sustainability** 9 (9), S. 1540. DOI: 10.3390/su9091540.
- Pehlken, A., Young, S.B. & Chen, M. (2017); Preface for the Special Issue “Assessing and Managing Life Cycles of Electric Vehicles” of the **Int J Life Cycle Assess** (2017) 22: 1. doi:10.1007/s11367-016-1219-1
- Pehlken, A., Albach, S., Vogt, T. (2017); Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars?, Special Issue “Assessing and Managing Life Cycles of Electric Vehicles” in the **Int J Life Cycle Assess** (2017) 22: 40. doi:10.1007/s11367-015-0925-4
- Burger, C.; Pehlken, A. (2018) ; A Data Context and Architecture for Automotive Recycling; Bookchapter in “From Science to Society, pp.215-224, Springer, 2018
- Kalverkamp, Matthias (2018): Hidden potentials in open-loop supply chains for remanufacturing. In: **Int Jnl Logistics Management**. DOI: 10.1108/IJLM-10-2017-0278.
- Kalverkamp, Matthias; Pehlken, Alexandra; Wuest, Thorsten; Young, Steven B. (2018): Sustainability of Cascading Product Lifecycles. The need for adaptive management to end-of-life supply chains. In: Proceedings of PLM2018. July 1-4, 2018, Turin, Italy.
- Kalverkamp, Matthias (2018): Open-Loop Supply Chains. Overcoming Shortages and Sustainability Issues in Remanufacturing. In: Kulwant. S. Pawar, Andrew Potter, Caroline Chan und Nyoman Pujawan (Hg.): Proceedings of the 23rd International Symposium on Logistics (ISL 2018). Big Data Enabled Supply Chain Innovations, Bali, Indonesia, 8 - 11th July 2018, S. 460–468.
- Burger, Clayton; Kalverkamp, Matthias; Pehlken, Alexandra (2018): Decision Making and Software Solutions with regard to Waste Management. In: **Journal of Cleaner Production**. Vol. 205, pp. 210-225, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.093>, available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618328130>
- Diedler, Sascha; Hobohm, Julia; Batinic, B.; Kalverkamp, Matthias; Kuchta, Kerstin (2018): WEEE data management in Germany and Serbia. In: Global NEST Journal. DOI: 10.30955/gnj.002657.
- Khan, Muztoba Ahmad; Kalverkamp, Matthias; Wuest, Thorsten (2019): Cascade Utilization During the End-of-Life of Product Service Systems. Synergies and Challenges. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): Cascade Use in Technologies 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–7.
- Pehlken, Alexandra; Koch, Björn; Kalverkamp, Matthias (2019): Assessment of Reusability of Used Car Part Components with Support of Decision Tool RAUPE. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): Cascade Use in Technologies 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 75–82.
- Kalverkamp, Matthias; Karbe, Neele (2019): Comparability of Life Cycle Assessments. Modelling and Analyzing LCA Using Different Databases. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): Cascade Use in Technologies 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 51–63.

- Kalverkamp, Matthias und Young, Steven B. (2019): In Support of Open-Loop Supply Chains: Expanding the scope of environmental sustainability in reverse supply chains. In: **Journal of Cleaner Production** Vol 214, 2019, pp 573-582
- Wittstock, R., Pehlken, A., Penaherrera, F., Wark, M: Assessment of the demand of critical raw materials for the implementation of fuel cells for stationary and mobile applications; IN: Cascade Use in Technologies - Internationale Konferenz zur Kaskadennutzung und Kreislaufwirtschaft – Oldenburg 2018, Springer Vieweg, 2019, 10.1007/978-3-662-57886-5
- Han, W., Shi, Y., Pehlken, A., Zhang G., Sui, P-C., Xiao, J; Reuse, Recycling and Recovery of End-of-Life new energy vehicles in China, IN: Cascade Use in Technologies - Internationale Konferenz zur Kaskadennutzung und Kreislaufwirtschaft – Oldenburg 2018, Springer Vieweg, 2019, 10.1007/978-3-662-57886-5
- E. Kwon, A. Pehlken, K.-D. Thoben, A. Bazylak, L.H. Shu; Visual similarity to aid alternative-use concept generation for retired wind-turbine blades, **Journal of Mechanical Design** 141, (2019); doi: 10.1115/1.4042336
- F. Peñaherrera. A. Pehlken, Assessment of the demand of critical materials for fuel cell micro CHP for households in Germany, Global NEST Journal, Vol 20, No 4, pp 758-766, https://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest_02645/gnest_02645_published.pdf
- Koch, B.,Peñaherrera, F., & Pehlken, A. (2019). Criticality and LCA – Building comparison values to show the impact of criticality on LCA. In European Center of Sustainable Development (Ed.), 7th International Conference on Sustainable Development (Vol. 2019). Rome, Italy
- Kalverkamp, M., Pehlken, A., Helmers, E., (2020): Impacts of Life Cycle Inventory Databases on Life Cycle Assessment: A review by means of a drivetrain case study, **International Journal on Cleaner Production** Vol. 207, 2020

Hier werden nur peer-reviewed Artikel genannt. Es gab noch unzählige Vorträge und weitere Artikel von Cascade Use.

Literaturverzeichnis

- Abbey, J.D., Blackburn, J.D., Guide, V.D.R., 2015. Optimal pricing for new and remanufactured products. *Journal of Operations Management* 36, 130–146.
- Agrawal, V.V., Ferguson, M., Toktay, L.B., Thomas, V.M., 2012. Is Leasing Greener Than Selling? *Management Science* 58, 523–533.
- Angerer, G., Erdmann, L. et al. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Schlussbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Fraunhofer ISI und IZT.
- APRA Europe, 2014. Automotive Parts Remanufacturing. Information about common definitions / wordings for the complete Remanufacturing Industry. https://cdn.ymaws.com/apra.org/resource/resmgr/European/Reman_Flyer_Web_2.pdf. Accessed December 18, 2018.
- Bakas, I, Jorgensen, B, Vogt, R, Giegrich, J, Comparative life cycle assessment of two options for waste tyre treatment: material recycling vs.co-incineration in cement kilns, Studie im Auftrag von Genan, 2009
- Barnes, J. H., 1982. Recycling. A Problem in Reverse Logistics. *Journal of Macromarketing*, 2 (2), 31–37.
- Bhattacharya, R., Kaur, A., Amit, R.K., 2018. Price optimization of multi-stage remanufacturing in a closed loop supply chain. *Journal of Cleaner Production* 186, 943–962.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., Seuring, S., 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management. *Developments and directions. European Journal of Operational Research* 233, 299–312.
- Buchert, M., Jenseit, W., Dittrich, S, F. Hacker, E. Schüler-Hainsch, K. Ruhland, S. Knöfel, D. Goldmann, K. Rasenack, F. Treffer, „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“, Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen, Abschlussbericht BMBF, 2011
- Difrancesco, R.M., Huchzermeier, A., 2015. Closed-loop supply chains. A guide to theory and practice. *International Journal of Logistics Research and Applications* 19, 443–464.
- Dodd-Frank Act, 2010. Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act. Pub. L. No. 111-203. Statutes at Large, 124, 1376. U.S. Government Publishing Office, (accessed July 12, 2016), [available at <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-111publ203/pdf/PLAW-111publ203.pdf>]
- EC, 2015a. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. COM(2015) 614 final, European Commission, Brussels.
- EC, 2015b. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. COM/2015/0593 final - 2015/0272 (COD), European Commission.
- EC 2017: MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS-UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017 (<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF>)
- ELV Directive 2000: Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles, .

- EMF, 2013. Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
- EU, 2000. DIRECTIVE 2000/53/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 September 2000 on end-of life vehicles. Official Journal of the European Communities 43, 34–42.
- EU, 2008. DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, 51 (L 312), 3–30.
- European Aluminium Association, Anteil an Aluminium an der Gesamtmasse eines PKW in den Jahren 2000 bis 2012. Statista. [Online] Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/285141/umfrage/aluminiumanteil-im-pkw-bis-2012/>. Accessed on: May 01 2018
- Euwid Recycling und Entsorgung 32/2014, Kaum Änderung bei Altreifenentsorgung
- Ferrer, G., Swaminathan, J.M., 2006. Managing New and Remanufactured Products. Management Science 52, 15–26.
- GAVS, Gesellschaft für Altgummi-Verwertungs-System mbH, 2014
- Guide, D.R., Harrison, T.P., van Wassenhove, L.N., 2003. The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. Interfaces 33, 3–6.
- Guide, D.R., van Wassenhove, L.N., 2009. The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. OR FORUM. Operations Research 57, 10–18.
- Hanges, P.J.; Lyon, J.S.; Dorfman, P.W., 2005. Managing a Multinational Team: Lessons from Project GLOBE. Managing Multinational Teams: Global Perspectives. Advances in International Management, Bd.18, pp. 337-360.
- Hirsch, Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e. V. (wdk), Frankfurt, 2014
- Huisman, Jaco; Pascal Leroy, François Tertre, Maria Ljunggren Söderman, Perrine Chancerel, Daniel Cassard, Amund N. Løvik, Patrick Wäger, Duncan Kushnir, Vera Susanne Rotter, Paul Mähltz, Lucía Herreras, Johanna Emmerich, Anders Hallberg, Hina Habib, Michelle Wagner, Sarah Downes. Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report, ISBN: 978-92-808-9060-0 (print), 978-92-808-9061-7 (electronic), December 21, 2017, Brussels, Belgium
- Kalverkamp, M., Pehlken, A., Wuest, T., 2017. Cascade Use and the Management of Product Lifecycles. Sustainability 9, 1540.
- Kalverkamp, M., Raabe, T., 2017. Automotive Remanufacturing in the Circular Economy in Europe. Marketing System Challenges. Journal of Macromarketing 38 (1), S. 112–130. DOI: 10.1177/0276146717739066.
- Kim, H.-J., McMillan, C., Keoleian, G.A., Skerlos, S.J., 2010. Greenhouse Gas Emissions Payback for Lightweighted Vehicles Using Aluminum and High-Strength Steel. Journal of Industrial Ecology 14, 929–946.
- Lind, S., Olsson, D., Sundin, E., 2014. Exploring inter-organizational relationships in automotive component remanufacturing. J Reman 4, 1–14.

- Lund, R.T., 1984. Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries. World Bank Technical Paper 31, Washington D.C.
- Majumder, P., Groenevelt, H., 2001. Competition in Remanufacturing. *Production and Operations Management* 10, 125–141.
- Östlin, J., Sundin, E., Björkman, M., 2008. Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 115, 336–348.
- Östlin, Johan, Erik Sundin, and Mats Björkman, 2009. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 17 (11), 999–1009
- Pehlken, Alexandra; Kalverkamp, Matthias (2015): Kaskadennutzung im Automobil - Realität oder Zukunftsmusik? In Thomé-Kozmiensky, Goldmann, Daniel (Ed.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kosmiensky; TK (Recycling und Rohstoffe, 8), pp. 173–182.
- Prahinski, C., Kocabasoglu, C., 2006. Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega* 34, 519–532.
- Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J.A.E.E., Spengler, T., 2010. From closed-loop to sustainable supply chains. The WEEE case. *International Journal of Production Research* 48, 4463–4481.
- Saavedra, Y.M.B., Barquet, A.P.B., Rozenfeld, H., Forcellini, F.A., Ometto, A.R., 2013. Remanufacturing in Brazil. Case studies on the automotive sector. *Journal of Cleaner Production* 53, 267–276.
- Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A.M., Hajiaghaei-Keshteli, M., 2018. Sustainable tire closed-loop supply chain network design. Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production* 196, 273–296.
- Sauer, A. Thielmann, „Energiespeichermonitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)“, Trendbericht BMBF, Förderkennzeichen 03X4616A, Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2013.
- Schmid, D., „Rezyklateinsatz in Neufahrzeugen,“ in *Recycling und Rohstoffe*, K. J. Thomé-Kozmiensky and D. Goldmann, Eds., Neuruppin: TK-Verl., 2010.
- Schmid, D., Zur-Lage, L., „Perspektiven für das Recycling von Altfahrzeugen: Moderne Fahrzeuge und angepasste Recyclingverfahren,“ in *Recycling und Rohstoffe: Vol. 7*, K. J. Thomé-Kozmiensky and D. Goldmann, Eds., Neuruppin: TK-Verl., 2014
- Seuring, S., 2013. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems* 54, 1513–1520.
- Seuring, S., Müller, M., 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production* 16, 1699–1710.
- Thierry, Martijn, Marc Salomon, Jo van Nunen, and Luk van Wassenhove, 1995. Strategic Issues in Product Recovery Management. *CALIFORNIA MANAGEMENT REVIEW*, 37 (2), 114–35.
- Yalabik, B., Chhajed, D., Petruzzi, N.C., 2014. Product and sales contract design in remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 154, 299–312.