



C.O.T - Circle of Tools

Förderkennzeichen: 033R230

2023

Teil 2 – Eingehende Darstellung

BMBF-Förderinitiative

Gefördert wird das Projekt Circle of Tools vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, FONA Förderprogramm ReZiprok – Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe, Projektträger ist der PTJ des Forschungszentrums Jülich

Forschungsvorhaben: 033R230

COT – CIRCLE OF TOOLS: Entwicklung und Erprobung geschlossener CE-Konzepte für die metallverarbeitende Werkzeug- und Schneidwarenindustrie

Projektpartner

Bergische Universität Wuppertal (BUW)

Prof. Arne Röttger
Lucas Wieczorek

P.F. FREUND & CIE. GmbH (Freund)

Hans-Dieter Sanker
René Füllbier

KIRSCHEN-Werkzeuge, Wilh. Schmitt & Comp. GmbH & Co. KG (Kirschen)

Thomas Becher

Plan Consult GmbH (Plan Consult)

Jens Damm

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI)

Dr. Manuel Bickel
Wiebke Hagedorn

Konsortialführer

TKM GmbH

Dr. Uwe Paffrath und
Thomas Kästner
In der Fleute 18
42897 Remscheid

Tel.: (0) 49-(0) 2191-969-296

E-Mail: tkaestner@tkmgoup.com

Inhalt

0	Einleitung	1
1	Ergebnisse	4
1.1	Arbeitspaket 1 – Ist-Zustand	4
1.1.1	<i>Identifizierung von Produkten für das Remanufacturing</i>	4
1.1.2	<i>Identifizierung von Produkten für das Repurposing</i>	5
1.1.3	<i>IST-Analyse als Vorbereitung der Nachhaltigkeitsbewertung</i>	6
1.1.4	<i>Bestimmung verwendeter Werkstoffe, Fügeverfahren und Wärmebehandlungsverfahren</i>	8
1.2	Arbeitspaket 2 – Re-Manufacturing	23
1.2.1	<i>Konzept und Herstellung von Kreismesser-Demonstratoren</i>	23
1.2.2	<i>Bewertung der Demonstratoren</i>	25
1.2.3	<i>Geschäftsmodellentwicklung</i>	25
1.3	Arbeitspaket 3 – Repurposing	27
1.3.1	<i>Konzept und Herstellung der Handwerkszeug-Demonstratoren</i>	27
1.3.2	<i>Bewertung der Demonstratoren</i>	36
1.3.3	<i>Geschäftsmodellentwicklung</i>	41
1.4	Arbeitspaket 4 – Rückholprozess	46
1.4.1	<i>Konzept für Kennzeichnung und Transport</i>	46
1.4.2	<i>Abbildung im ERP-System, logistische Betrachtung und buchhalterische Bewertung</i>	48
1.5	Arbeitspaket 5 – Nachhaltigkeitsbewertung	57
1.5.1	<i>Definitive Grundlagen</i>	57
1.5.2	<i>Ableitung der übergeordneten Zielgrößen</i>	60
1.5.3	<i>Indikatorenidentifikation für Reuse und Remanufacturing</i>	60
1.5.4	<i>Ökologische Bewertung von Remanufacturing</i>	63
1.5.5	<i>Ökologische Bewertung von Repurposing</i>	64
1.5.6	<i>Ökonomische Analyse</i>	66
1.5.7	<i>Ergebnisse sortenreines Recycling</i>	68
1.5.8	<i>Preis- und Marktentwicklung der Stahlproduktion</i>	68
1.6	Arbeitspaket 6 – Regionalwirtschaftliche Übertragbarkeit	72
1.6.1	<i>Faktoren der Übertragbarkeit (notwendige Bedingungen)</i>	73
1.6.2	<i>Faktoren der ökologischen, ökonomischen und technischen Machbarkeit</i>	74
1.6.3	<i>Potenziale der industriellen Symbiose - IST und möglicher SOLL Zustand</i>	74

1.7	Arbeitspaket 7 – Politikempfehlungen	82
1.7.1	<i>Bestehende Politikinstrumente</i>	82
1.7.2	<i>Steuerungsmöglichkeiten und Anreizsysteme</i>	83
1.8	Arbeitspaket 8 – Transfer	89
1.8.1	<i>Im Jahr 2019</i>	91
1.8.2	<i>Im Jahr 2020</i>	91
1.8.3	<i>Im Jahr 2021</i>	91
1.8.4	<i>Im Jahr 2022</i>	92
2	Verwertungsplan	94
2.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	94
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	94
2.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans	94
2.4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	94
2.5	Erfolge / geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	95
2.6	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	95
2.7	Ausgaben- und Zeitplan	95
3	Glossar	96
4	Literaturverzeichnis	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Auflistung von Abmaßen der Maschinenkreismesser	4
Tabelle 1-2:	Von TKM, Kirschen und Freund bereitgestellte und mögliche* Repurposing-Produkte.	9
Tabelle 1-3:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des TKM Probenmaterials, ermittelt mittels OES-Analyse, Im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des hochlegierten Kaltarbeitsstahls 1.2379 (X153CrMoV12). Alle Angaben in Masse-%.	11
Tabelle 1-4:	Auszug der chemischen Zusammensetzung der Kirschen Standard-Drechslerbeitel, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des niedriglegierten Kaltarbeitsstahls 1.2235 (80CrV2). Alle Angaben in Masse-%.	12
Tabelle 1-5:	Norm-Zusammensetzung des Schnellarbeitsstahls 1.3343 (HS6-5-2C). Alle Angaben in Masse-%.	12
Tabelle 1-6:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des Freund Pappreißmessers mit langer Klinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U). Alle Angaben in Masse-%.....	13
Tabelle 1-7:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des Freund Pappreißmessers mit kurzer Klinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Vergütungsstahls 1.0601 (C60). Alle Angaben in Masse-%.	13
Tabelle 1-8:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des Freund Pappreißmessers mit Hakenklinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des 1.2003 (Cr751). Alle Angaben in Masse-%.....	14
Tabelle 1-9:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des Freund Ersatzmessers für die Knabber-Blechscherer, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der definierten Zusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.2360 (X48CrMoV8-1-1). Alle Angaben in Masse-%.	14
Tabelle 1-10:	Auszug der chemischen Zusammensetzung des Freund Ersatzmessers für die Fassadenplattenscherer Nr. 96, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des hochlegierten Kaltarbeitsstahls 1.2379 (X153CrMoV12). Alle Angaben in Masse-%.	15
Tabelle 1-11:	Auszug der chemischen Zusammensetzung der Freund Ersatzklinge für den Dachbahnschneider, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U). Alle Angaben in Masse-%.	15
Tabelle 1-12:	Ergebnisse der 2D-Flächenauswertung der Drechselspitze.	38
Tabelle 1-13:	Übersicht an Ertragsmodellen (Lindkvist & Sundin, 2016).....	44
Tabelle 1-14:	Übersicht an Richtlinien auf EU-Ebene (Pastor et al., 2014)	45
Tabelle 1-15:	Bewertungsansätze zur Ausweisung von Nachhaltigkeitsaktivitäten	46
Tabelle 1-16:	Mögliche Zielgrößen zur Selektion und Bewertung von Indikatoren (Hagedorn et al., 2019)	60
Tabelle 1-17:	Spannbreite der Ergebnisse der ökologischen Einsparpotenziale	79
Tabelle 1-18:	SWOT-Analyse	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-1:	Struktur der Arbeitspakete des Forschungsvorhabens Circle of Tools	1
Abbildung 0-2:	Arbeits- und Zeitplan des Projekts Circle of Tools	3
Abbildung 1-1:	Produktauswahl im Rahmen eines Projektmeetings bei Kirschen	5
Abbildung 1-2:	Ein vereinfachtes Prozessdiagramm für die Herstellung eines Rohprodukts aus Stahl. (Eigene Darstellung nach Cullen et al. (2012), Martens & Goldmann (2016), Ruge & Wohlfahrt (2013)).....	7
Abbildung 1-3:	Ein vereinfachtes Prozessdiagramm für die Herstellung eines Drechselwerkzeugs (Eigene Darstellung)	7
Abbildung 1-4:	Prozessdiagramm der Fertigung eines Maschinenkreismessers.....	8
Abbildung 1-6:	Plangeschliffene Ronde des Unternehmens TKM mit 610 mm Durchmesser und 5 mm Blechdicke aus X155CrMoV12	10
Abbildung 1-5:	Holzbearbeitungswerkzeuge von Kirschen:	10
Abbildung 1-7:	Pappreißmesser von Freund.....	10
Abbildung 1-8:	Freund Produkte: a) Ersatzmesser für Knabber-Blechscheren b) Ersatzklinge für Dachbahnschneider c) Plattenreißer mit Hartmetall-Wechselklinge d) Hartmetall-Rädchen für Bibermax	10
Abbildung 1-9:	Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs X155CrMoV12 (1.2379). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.	18
Abbildung 1-10:	Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs 80CrV2 (1.2235). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.....	18
Abbildung 1-11:	Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs HSS6- 5-2C (1.3343). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.	19
Abbildung 1-12:	Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs 75Cr1 (1.2003). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.....	19
Abbildung 1-13:	Lichtmikroskopische Aufnahme des Gefüges des TKM Kreismessers. Probenmaterials im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 100-facher Vergrößerung und b) 500-facher Vergrößerung. ...	20
Abbildung 1-14:	Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel 80CrV2 (1.2235) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.	21
Abbildung 1-15:	Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel HSS6-5- 2C (1.3343) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.	22
Abbildung 1-16:	Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel 75Cr1 (1.2003) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.	22
Abbildung 1-17:	Ermittelte Härtewerte der verwendeten Werkstoffe der ausgewählten Repurpose- Produkte in HV10.	23
Abbildung 1-18:	Bearbeitungskonzept Remanufacturing von Kreismessern (Foto: Hagedorn).....	24
Abbildung 1-19:	Demonstrator-Kreismesser nach der Bund- (links) und nach der Watenbearbeitung (rechts)	25
Abbildung 1-20:	Schematische Darstellung eines 611er Maschinenkreismessers und seiner Abmessungen.	28
Abbildung 1-21:	Beispielhafte Darstellung der Vorzugsrichtung der Karbide innerhalb des Schneidenbereichs eines Repurpose-Pappreißmessers mit Hakenklinge. Oben "längs" zur Schneide, unten "quer".	29
Abbildung 1-22:	Zwei Schnittmuster für eine möglichst optimale Anordnung der Repurpose-Rohlinge innerhalb eines verschlissenen Kreismessers.....	29

Abbildung 1-23:	Schematische Darstellung des Konzepts für den Repurposeprozess. Aus verschlissenen bzw. unbrauchbaren 611er Kreismessern werden über trennende Fertigungsverfahren Rohlinge für neue Handwerkzeuge hergestellt. Anschließend werden diese geschliffen und finalisiert.....	30
Abbildung 1-24:	Erstellen eines Abdrucks mit einer Celluloseacetatfolie zur Bestimmung der Gefügezeitigkeit. a) präparierter Bereich auf dem Kreismesser, b) aufbringen der Celluloseacetatfolie und c) lichtmikroskopische Aufnahme der Celluloseacetatfolie. (Eigene Darstellung)	31
Abbildung 1-25:	Lichtmikroskopische Gefügaufnahmen des Maschinenkreismessers. a) Gefügaufnahme durch klassischen metallographischen Schliff und b) Aufnahme der des Abdrucks der Celluloseacetatfolie. 31	
Abbildung 1-26:	Abbildung eines Maschinenkreismesser in einer Wasserstrahlanlage. a) Anordnung im Maschinenbett mit Markierung der Karbidvorzugsrichtung rechts neben der Zentralbohrung, b) Schneidprozess beim Wasserstrahlschneiden mit Rohlingen.	32
Abbildung 1-27:	Abbildung eines verschlissenen Maschinekreismesser in einer Laserstrahlanlage.	32
Abbildung 1-28:	Abbildung der durch das Wasserstrahlschneiden gebrochenen Kreismesser und Rohlingen. a) gerissenes und gebrochenes Kreismesser, b) gebrochene Rohlinge des Pappreißmessers mit Hakenklinge und c) korrodierte und während des Schleifprozesses gebrochenen Pappreißmesser mit Hakenklinge. 33	
Abbildung 1-29:	Darstellung der Wärmeeinflusszone die durch das Laserstrahlschneiden im Randbereich der Repurpose-Rohlinge induziert wird.....	34
Abbildung 1-30:	Abbildung von ausgeschnitten Demonstrator-Werkzeugen durch den Repurpose-Prozess. a) unterschiedlichste gefertigte und geschliffene Demonstratoren der Firmen Kirschen und Freund, b) fertig montierter Repurpose-Drehsselbeitel (oben) und Pappreißmesser mit Hakenklinge (unten).	35
Abbildung 1-31:	Versuchsaufbau des Verschleißversuches der Drehsselbeitel. Links: Gesamtaufnahme der Versuchsvorrichtung, Rechts: Detailaufnahme des Werkzeughalters	37
Abbildung 1-32:	Anlassfarben der im Verschleißversuch verwendeten Drehsselspitzen.	37
Abbildung 1-33:	Darstellung der 2D-Flächenauswertung. Links: Abbildung der Drehsselspitze mit definierter Grundfläche, Rechts: Abbildung der verschlissenen Drehsselspitze.....	38
Abbildung 1-34:	Darstellung des Schneidversuchs für Pappreißmesser. Links: Schematische Darstellung der Schneidbewegung und Anordnung des Schneidzeugs und Schnittguts. Rechts: Eingebaute Versuchsvorrichtung in der Universalprüfmaschine.	39
Abbildung 1-35:	Darstellung des Kraft-Weg-Diagramme mit Vergleich des Schnittkräfte nach einem Zyklus (links) und nach 50 Zyklen (rechts).	40
Abbildung 1-36:	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Schneiden. Zu erkennen sind die scharf geschliffenen Schneiden im Ausgangszustand (oben) und die deutlich eintretende verschleißbedingte Kantenverrundung (unten).....	41
Abbildung 1-37:	Transportbehälter für verschlissene Kreismesser	47
Abbildung 1-38	Die Konzepte und Strategien der Circular Economy nach Potting et al. (2017)	59
Abbildung 1-39:	Ergebnisse der Literaturanalyse zum Thema CE-Indikatorik auf Mikroebene (Hagedorn, Kick, et al., 2020).....	63
Abbildung 1-40:	Ergebnisse der Literaturanalyse zum Thema CE-Indikatorik auf Mikroebene (Hagedorn et al., 2021) 65	
Abbildung 1-41:	Ökonomische Analyse nach Target Costing (Wöhe & Döring, 2013)	66
Abbildung 1-42:	Preise für Eisen und Stahl (DERA, 2021a).....	69
Abbildung 1-43:	Preisentwicklung – Stahlhalbzeug und Schrott (destatis, 2021)	71
Abbildung 1-44:	Preisentwicklung – Stahlhalbzeug und Schrott (relativ)(destatis, 2021)	71
Abbildung 1-45:	Materialfluss IST TKM 2019	75
Abbildung 1-46:	Materialfluss SOLL TKM 2019.....	76
Abbildung 1-47:	Materialfluss IST Kirschen 2019.....	77

<i>Abbildung 1-48:</i>	<i>Materialfluss SOLL Kirschen 2019</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 1-49:</i>	<i>Vergleich des Produktionswertes von Städten des Bergischen Städtedreiecks</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 1-50:</i>	<i>Vergleich der Emissionen (CO₂eq) nach Wirtschaftszweigen von Städten des Bergischen Städtedreiecks</i>	<i>81</i>

0 Einleitung

Die zugrundeliegende These der Circular Economy ist, dass Rohstoffe so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf gehalten werden sollen. Im Sektor der Metallwaren ist eine legierungsspezifische Rückführung von Material derzeit kaum möglich. Das Umschmelzen von Schrott von bspw. hochwertigem Werkzeugstahl führt aktuell zum Verlust der darin enthaltenen Legierungselemente. Zentrales Anliegen des Projektes „Circle of Tools“ ist es daher, regionale Stoffkreisläufe in der metallverarbeitenden Industrie mit dem Schwerpunkt (Hand-) Werkzeuge und Schneidwaren zu schließen. Zentraler industrieller Akteur des Vorhabens ist das Unternehmen *TKM* aus Remscheid, das eine große Bandbreite an Maschinenkreismessern fertigt. Verschlossene Maschinenkreismesser sollen zum Ende ihrer Lebensdauer nicht einem Umschmelzen zugeführt werden. Stattdessen ist es das Ziel, durch Remanufacturing und Repurposing die Nutzungsdauer der mit hohem Energie- und Ressourcenaufwand erzeugten Metallhalbzeuge über die Erzeugung weiterer Produkte aus den Schneidmessern am Ende ihrer Lebenszeit zu verlängern. Die Ansätze sollen unternehmensübergreifend aufgestellt werden und erfordern eine digital unterstützte Logistikkette. Als Ergebnis des Verbundprojekts sollten die Kaskadennutzung sowie geeignete Geschäftsmodelle entwickelt, bewertet und modellhaft umgesetzt werden.

Das Projekt gliedert sich in Forschungsschwerpunkte, die phasenweise aufeinander aufbauen, siehe Abbildung 0-1. Der Arbeitsablauf gliedert sich in acht Arbeitspakete plus das Projektmanagement. Darauf aufbauend stellt der vorliegende Bericht die Zwischenergebnisse aus dem Jahr 2022 sowie die Gesamt dar und umfasst die Konzept-Entwicklungen für Remanufacturing (Arbeitspaket 2), Repurposing (Arbeitspaket 3), des Rückholprozesses (Arbeitspaket 4), der Nachhaltigkeitsbewertung (Arbeitspaket 5), der regionalwirtschaftlichen Übertragbarkeit (Arbeitspaket 6) sowie des Transfers (Arbeitspaket 8).

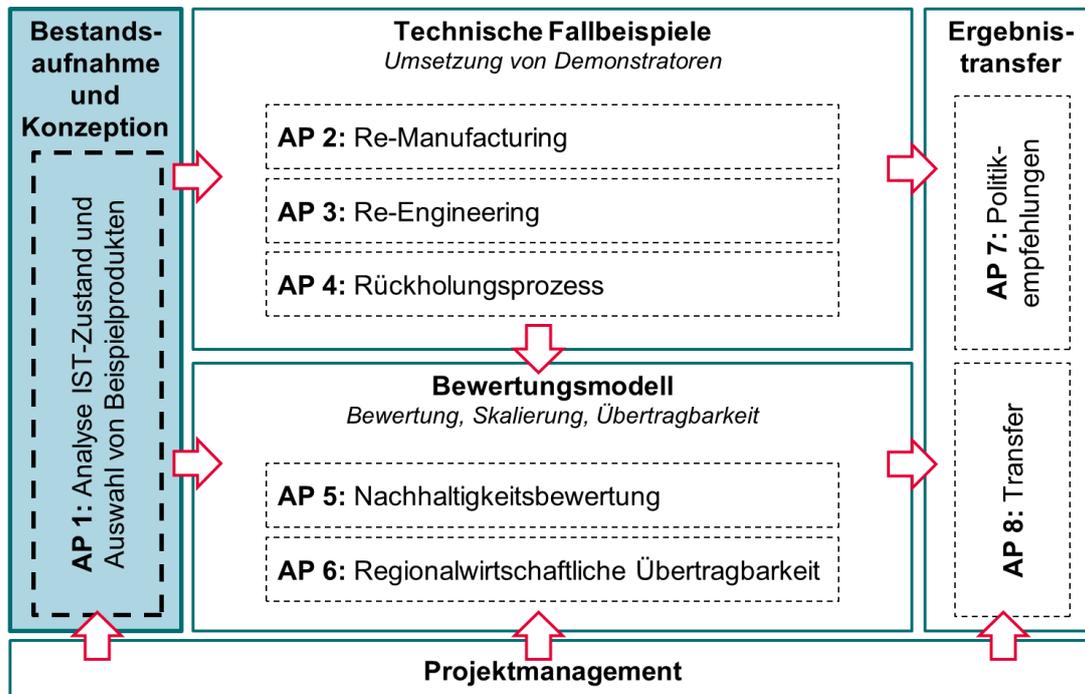


Abbildung 0-1: Struktur der Arbeitspakete des Forschungsvorhabens Circle of Tools

Der Bericht ist entsprechend des Zeitplans gegliedert und enthält die Ergebnisse der enthaltenen Arbeitspakete. Bei der Betrachtung des aufgestellten Zeitplans ist die bereits im ersten Zwischenbericht

erwähnte Verschiebung des Projektstarts zu berücksichtigen. Durch eine verlängerte Findungsphase für qualifiziertes wissenschaftliches Personal bei den Forschungs- und Projektpartnern *WI* und *BUW*, verschob sich der geplante Projektstart um drei Monate. Damit lief der Projektstart bei den wissenschaftlichen Partnern erst im Oktober 2019 an. Des Weiteren verlangsamten die einschneidenden Veränderungen des öffentlichen Lebens, bedingt durch die Corona-Pandemie, den gesamten Projektfortschritt. Aufgrund der Kontaktbeschränkungen war das Erheben von Daten in den Fertigungseinrichtungen von relevanten Betrieben nur bedingt möglich. Zudem sind die wissenschaftlichen Partner zum großen Teil im Home Office, wodurch nur eingeschränkt Laborversuche durchgeführt werden können. Diese Restriktionen verschoben den Projektstand ebenfalls um zwei weitere Monate.

Diese Umstände machten eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um 6 Monate notwendig. Diese wurde beantragt und genehmigt. Die geplanten Arbeiten konnten im verlängerten Zeitraum umgesetzt und die Forschungsziele erreicht werden.

1 Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1 – Ist-Zustand

1.1.1 Identifizierung von Produkten für das Remanufacturing

In der ersten Phase des Projekts stand die Produktauswahl für das Repurposing und die Bestimmung des IST-Zustands im Vordergrund. Entsprechend ist im Folgenden zunächst der Prozess der Produktauswahl beschrieben und die relevanten Kriterien. Auf Basis der definierten Produkte kam es dann zur Aufnahme der derzeitigen Produktionsabläufe. Daran schließen die Charakterisierung der ausgewählten Werkzeuge und Ronden an.

In der nachstehenden Tabelle 1-1 sind die geometrischen Abmaße der Maschinenkreismesser aufgelistet, da diese die Ausgangsprodukte für beide R-Strategien bilden. Neben den Durchmessern unterscheiden sich die Ronden ebenfalls in der Blechdicke, der Zentralbohrung und dem angeschliffenen Flansch. Der Flansch bezeichnet den inneren Durchmesser mit durchgängiger Blechdicke. Das bedeutet bei einer 1000er Ronde entsteht ein äußerer Ring von 340 mm Breite mit abnehmender Blechdicke.

Tabelle 1-1: Auflistung von Abmaßen der Maschinenkreismesser

Rondenbezeichnung	Art. Nr.	Durchmesser [mm]	Max. Blechdicke [mm]	Zentralbohrung [mm]	Flansch [mm]
1000er Ronde	602590	Ø 1000	8	Ø 60	Ø 320
870er Ronde	696708	Ø 870	6	Ø 60	Ø380
810er Ronde	602589	Ø 810	6	Ø 60	Ø 320
611er Ronde	210120 26674 260927	Ø 611	5	Ø 68/82/100	Ø 180-230

Um die Strategie des Remanufacturing anwenden zu können, müssen bestimmte geometrische Eigenschaften erfüllt werden. Das Remanufacturing als Strategie des CE Ansatzes sieht die Nutzung eines defekten Produkts, bzw. dessen Bauteile, in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion vor. Dadurch, dass neben einem kleineren Durchmesser ebenfalls die Blechdicke der Maschinenkreismesser abnimmt, wäre es möglich aus einer 1000er Ronde, eine kleinere Ronde zu schleifen. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass die Zentralbohrung der kleinsten 611er Messer laut den technischen Zeichnungen größer ist. Somit wäre ein Aufweiten der Zentralbohrung möglich. Laut des Vertriebs von TKM weisen verschlissene Maschinenkreismesser einen Durchmesser Verlust von ca. 100 mm auf. Um diese Aussage überprüfen zu können, muss der in AP4 angestrebte Rückholprozess eingeleitet und verschlissene Kreismesser charakterisiert werden. Im Anschluss an die vollständige Charakterisierung erfolgt die Entwicklung des Remanufacturing-Prozesses der 1000er, 870er und 810er Maschinenkreismesser.

Potenzielle Kunden wurden mehrstufig ermittelt, mit dem Ziel sowohl Kunden in Abhängigkeit der Distanz als auch in Abhängigkeit des Absatzvolumens zu identifizieren. Kunden in direkter Umgebung (Distanz bis 200 km) zeichnen sich im Rahmen des Projektes als potenzielle Lieferanten für Versuchswerkstücke sowie für Einsatzversuche aus. Dem gegenüber stehen Kunden mit einem hohen Abnahmevolumen, die für eine Betrachtung des kontinuierlichen Rückholprozesses in Frage kommen.

1.1.2 Identifizierung von Produkten für das Repurposing

Um mögliche Produkte für das Repurposing zu identifizieren sind die geometrischen Maße der 611er Ronde als Ausgangsmaterial festgelegt worden, da diese über 90% der Jahresproduktion von TKM ausmachen. Auf Grundlage der geometrischen Daten haben Freund und Kirschen ihre Produktportfolios analysiert und ausgewählte Produkte während eines Projektmeetings vorgestellt. Im Rahmen eines Projektmeetings wurden zusammen mit den wissenschaftlichen Partnern des WIs und der BUW geeignete Produkte für das Repurposing ausgewählt (Abbildung 1-1). Um zukünftig neue Produkte oder Unternehmen einzubeziehen, müssen alle relevanten Daten der Produkte in einem ERP-System erfasst werden.



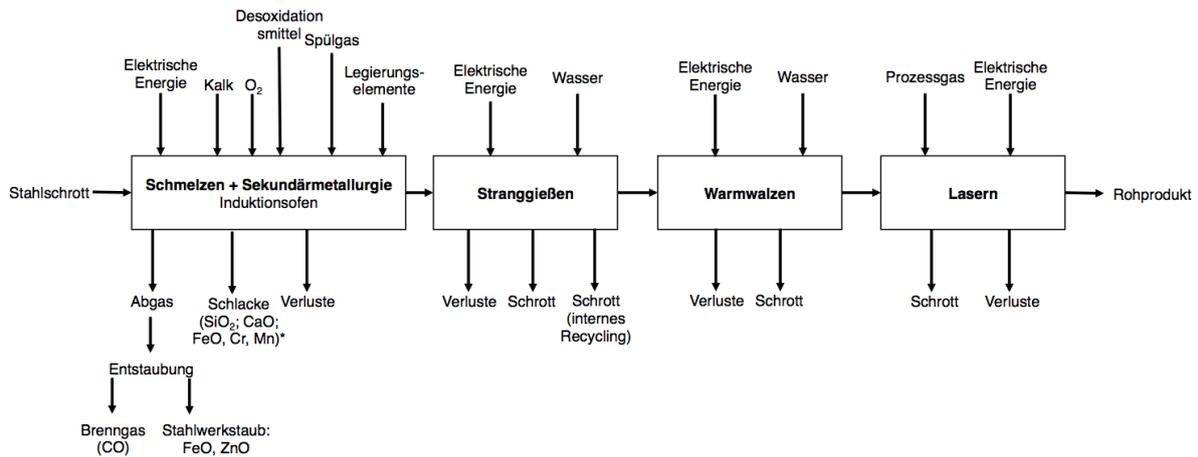
Abbildung 1-1: Produktauswahl im Rahmen eines Projektmeetings bei Kirschen

Aus dem Produktportfolio von *Kirschen* wurden Drehwerkzeuge mit derselben Geometrie aus zwei verschiedenen Werkstoffen, 1.2235 (80CrV2) und 1.3343 (HS6-5-2C), ausgewählt. Diese wurden ausgewählt, da Repurposing Drehwerkzeuge aus dem hochlegierten Werkzeugstahl 1.2379 (X153CrMoV12) eine deutliche höhere Standzeit vermuten lassen als der bisherige niedriger legierte Werkzeugstahl 1.2235 (80CrV2). Des Weiteren erscheint das Ersetzen des noch höher legierten Schnellarbeitsstahl 1.3343 (HS6-5-2C) bei gleicher Standzeit durch den hochlegierten Werkzeugstahl 1.2379 (X153CrMoV12) sinnvoll. Beides sind Thesen, dessen Analyse im Projekt erfolgte. Die Werkzeuge der Firma *Kirschen* benötigen eine durchgehende Blechdicke von $t = 5$ mm, deshalb eignen sie sich vorwiegend dafür, aus dem Flanschbereich entnommen zu werden.

Ergänzend zu den Drechselwerkzeugen von *Kirschen* wurden verschiedene Produkte von *Freund* analysiert, um kleinere Bereiche des Flanschbereichs ebenfalls ausnutzen zu können. Hierzu wurden ein Pappreißmesser mit Hakenklinge, eine Ersatzklinge für einen Plattenanreißer und eine Ersatzklinge für eine Knabber-Blechscherer ausgewählt. Diese eignen sich aufgrund abnehmender Blechdicke dafür aus dem äußeren Rand der Ronde entnommen zu werden.

1.1.3 IST-Analyse als Vorbereitung der Nachhaltigkeitsbewertung

Für die Entwicklung der zirkulären Fertigungsprozesse und für die Nachhaltigkeitsbewertung ist die Erfassung der linearen Produktionsprozesse grundlegend. Im Zentrum der IST-Analyse stehen die drei ausgewählten Produkte, ein Maschinenkreismesser, ein Drechselwerkzeug und ein Pappreißmesser. Die Erhebung der Produktionsdaten sind eine Arbeitsphase des Life Cycle Assessments (LCA) die in Arbeitspaket 5 Anwendung findet. Orientiert an den definierten Zielsetzungen und Systemgrenzen erfolgte die Erstellung von Fragebögen und die Erhebung von Primärdaten. Zur Erfassung der Daten dienten Werksführungen, Dialoge und Fragebögen sowie eine Projektarbeit der *BUW* über das Maschinenkreismesser. Konkret führten *TKM*, *Freund* und *Kirschen* jeweils teils mehrere Werksführungen an den Standorten Remscheid (*TKM* und *Kirschen*) sowie Wuppertal (*Freund*) durch. Während den Werksführungen konnte die Abfolge der wesentlichen Prozessschritte und erste Primärdaten erfasst und dokumentiert werden. Aufbauend auf den Protokollen erfolgten die ersten Skizzen der Prozessschritte und das Erstellen von Fragebögen. Die produktspezifischen Fragebögen erhielten die jeweiligen Industriepartner. Ziel der Befragung war das Erfassen wesentlicher Input- und Outputströme bzw. Informationen, die dessen Herleitung erlauben. Dazu gehören bspw. Entfernungen zwischen Standorten sowie Art des Transportmittels, Mengen an Betriebsmitteln und Rohmaterialien sowie Energieverbräuche bestimmter Maschinen. Um die IST-Analyse und die erhobenen Daten übersichtlich abbilden zu können, erfolgte zudem die Visualisierung der Ergebnisse in Form von 10 Prozessdiagrammen für jede Wertschöpfungskette. In den nachstehenden Abbildungen sind exemplarisch vereinfachte Prozessdiagramme dargestellt.



*Schlackenzusammensetzung unter Verwendung von SiMn als Desoxidationsmittel

Abbildung 1-2: Ein vereinfachtes Prozessdiagramm für die Herstellung eines Rohprodukts aus Stahl. (Eigene Darstellung nach Cullen et al. (2012), Martens & Goldmann (2016), Ruge & Wohlfahrt (2013))

Die Abbildung 1-2 veranschaulicht die Herstellung eines Rohprodukts aus Stahl. Diese sehr allgemein gehaltenen Prozessschritte entsprechen der Literatur (Cullen et al., 2012; Martens & Goldmann, 2016; Ruge & Wohlfahrt, 2013). Zu jedem einzelnen Prozess führen einzelne Input und Output-Ströme hin bzw. weg. Die jeweiligen Stoffströme sind im produktspezifischen Fall zu konkretisieren und die Mengenangaben zu definieren. Diese offenen Punkte waren u.a. Teil der Fragebögen an die Industriepartner.

Auf Basis der Werksführungen bei *Kirschen* entstand für das Drechselwerkzeug ein Prozessdiagramm für die Weiterverarbeitung des Halbzeugs zum finalen Produkt. Diese ist in der nachstehenden Abbildung 1-3: vereinfacht dargestellt.



Abbildung 1-3: Ein vereinfachtes Prozessdiagramm für die Herstellung eines Drechselwerkzeugs (Eigene Darstellung)

Grundsätzlich besteht der Verarbeitungsprozess vom Rohprodukt der Klinge als Rohprodukt bis zum Endprodukt aus 9 Prozessen, die *Kirschen* alle am Standort Remscheid durchführt. Die Prozesse Härten, Anlassen, Schleifen und Lackieren sind hier zusammengefasst dargestellt, um die Abbildbarkeit zu verbessern. Die Prozesse bestehen jeweils aus zwei bis vier Teilprozesse. Die quantifizierten Input- und Output-Ströme sind bekannt, aber nicht in die Abbildung integriert.

Entsprechend des beschriebenen Vorgehens erfolgte auch das Erarbeiten der Prozessdiagramme für das Maschinenkreismesser von *TKM* und das Pappreißmesser von *Freund*. Das Prozessdiagramm für die Verarbeitung der Ronden als Halbzeug zum distributionsfertigen Maschinenkreismesser bei *TKM* am Standort Remscheid ist nachstehend abgebildet (Abbildung 1-4:).

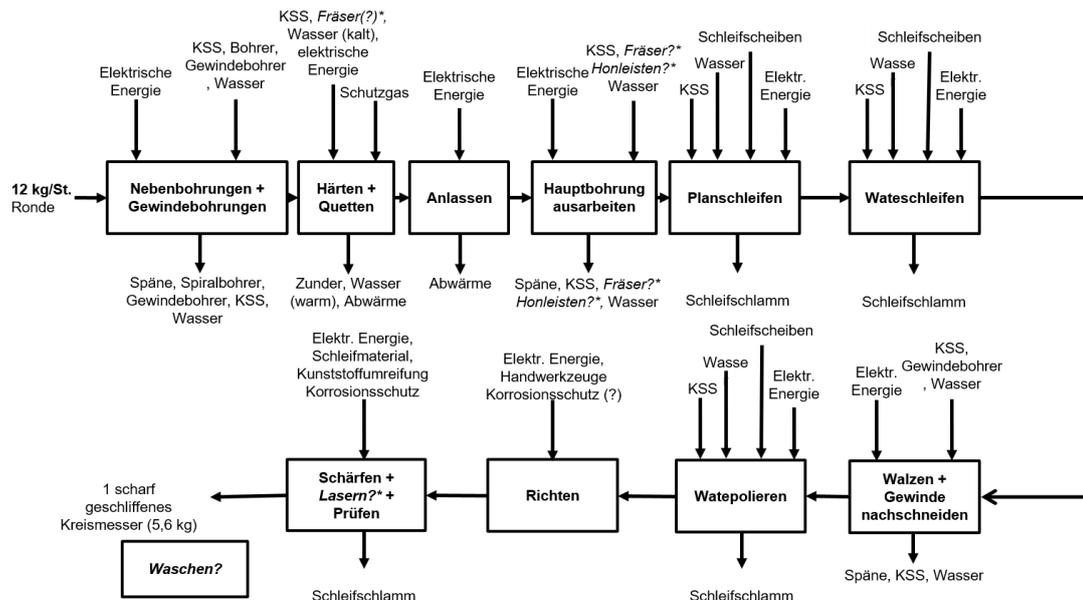


Abbildung 1-4: Prozessdiagramm der Fertigung eines Maschinenkreismessers

1.1.4 Bestimmung verwendeter Werkstoffe, Fügeverfahren und Wärmebehandlungsverfahren

Für die Charakterisierung des Ausgangszustandes wurden durch *TKM*, *Kirschen* und *Freund* Probenmaterial bereitgestellt. Der Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe der *BUW* hat die durch die Industriepartner bereitgestellten Materialien werkstoffkundlich charakterisiert. Dazu gehörten die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung, metallografische Untersuchungen sowie Härtemessungen und die Recherche von Werkstoffeigenschaften.

Eine Übersicht aller von *TKM*, *Kirschen* und *Freund* bereitgestellten Materialien ist in Tabelle 1-2 zu sehen. Das Probenmaterial wurde fotografisch dokumentiert (Abbildung 1-6 bis Abbildung 1-8).

Tabelle 1-2: Von TKM, Kirschen und Freund bereitgestellte und mögliche* Repurposing-Produkte.

Nr.	Hersteller	Produkt	Maße	Prozess	Anwendung
1*	TKM*	1000er Runde*	d = 1000 mm t = 8 mm	Reman.	Maschinenmesser für die Papierindustrie
2*	TKM*	870er Runde*	d = 870 mm t = 6 mm	Reman. Repur.	
3	TKM	810er Runde	d = 810 mm t = 6 mm	Reman. Repur.	
4*	TKM*	611er Runde*	d = 611 mm t = 5 mm	Repur.	
5*	Kirschen*	Drechslerbeitel, kurze Form*	t = 5 mm	Repur.	Werkzeuge für die Holzbearbeitung
6	Kirschen	Flachmeißel, gerade, einballig	t = 5,5 mm	Repur.	
7	Kirschen	Ausdrehstahl, runde Schneide	t = 7,4 mm	Repur.	
8*	Kirschen*	Schnellarbeitsstahl (HSS-) Meißel*	t = 5,5 mm	Repur.	
9	Freund	Pappreißmesser lange Klinge	t _{max.} = 1,8 mm	Repur.	Anreißen von Bitumenbahnen
10	Freund	Pappreißmesser kurze Klinge	t _{max.} = 1,8 mm	Repur.	
11*	Freund*	Pappreißmesser Hakenklinge*	t _{max.} = 1,8 mm	Repur.	
12*	Freund*	Ersatzmesser für Knabberblechschere*	t _{max.} = 2,7 mm	Repur.	Schneiden von Blechen
13	Freund	Ersatzmesser für Fassadenplattenschere Nr. 96	l = 800 mm	Repur.	Schneiden von Fassadenplatten
14	Freund	Ersatzklinge Dachbahnschneider	t = 0,4 mm	Repur.	Schneiden von Dachbahnen
15*	Freund*	Plattenanreißer mit Hartmetall- Wechselklinge*	t = 2 mm	Repur.	Anreißen von Fassadenplatten und Dachziegeln
16	Freund	Hartmetall-Rädchen für Bibermax II	t _{max.} = 1,8 mm	Repur.	Brechen von Biberschwanzziegeln

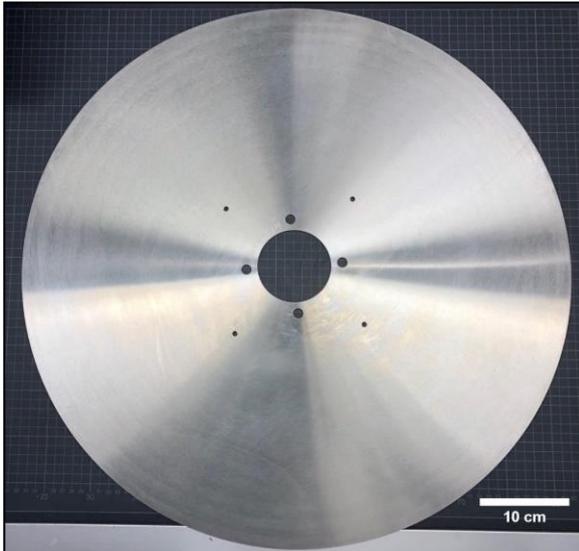


Abbildung 1-6: Plangeschlossene Ronde des Unternehmens *TKM* mit 610 mm Durchmesser und 5 mm Blechdicke aus X155CrMoV12



Abbildung 1-7: Pappreißmesser von Freund

- a) lange Klinge
- b) kurze Klinge
- c) Hakenklinge



Abbildung 1-5: Holzbearbeitungswerkzeuge von Kirschen:

- a) Drechslerbeitel, kurze Form
- b) Flachmeißel, gerade, einballig;
- c) Ausdrehstahl, runde Schneide;
- d) HSS Meißel



Abbildung 1-8: Freund Produkte:

- a) Ersatzmesser für Knabber-Bleischere
- b) Ersatzklinge für Dachbahnschneider
- c) Plattenreißer mit Hartmetall-Wechselklinge
- d) Hartmetall-Rädchen für Bibermax

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Probenmaterials wurden optische Emissionsspektrometrie Analysen (OES) durchgeführt. Hierfür wurde das optische Emissionsspektrometer vom Typ ARL 3460B vom Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe der Bergischen Universität Wuppertal im Werkstofflabor in Solingen eingesetzt. Anhand der OES-Analysen wurden die Werkstoffe des Probenmaterials mit Hilfe der Datenbank StahlWissen® NaviMat XXL der Dr. Sommer Werkstofftechnik GmbH identifiziert.

TKM-Probenmaterial:

TKM bezieht als Material von seinen Zulieferern den höchst verschleißbeständigen, hochlegierten Kaltarbeitsstahl 1.2379 (X153CrMoV12), dessen chemische Zusammensetzung in der DIN EN ISO 4957:2018-11 (Werkzeugstähle) festgelegt ist. Ein Auszug der, mittels OES, gemessenen chemischen Zusammensetzung des TKM- Probenmaterials, sowie die Norm-Zusammensetzung des 1.2379 (X153CrMoV12) sind in Tabelle 1-3 sehen. Alle Elemente des TKM Probenmaterials befinden sich innerhalb der Normgrenzen des 1.2379 (X153CrMoV12).

Tabelle 1-3: Auszug der chemischen Zusammensetzung des TKM Probenmaterials, ermittelt mittels OES-Analyse, Im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des hochlegierten Kaltarbeitsstahls 1.2379 (X153CrMoV12). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
TKM Probenmaterial (gemessen)	1,53	11,34	0,70	0,70	0,6	0,48	0,02	0,02
1.2379 (X153CrMoV12)	1,45- 1,60	11,0- 13,00	0,70- 1,00	0,70- 1,00	0,10- 0,60	0,20- 0,60	max. 0,030	max. 0,030
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen								

Kirschen-Produkte:

Kirschen bezieht für seine Standard-Drechslerbeitel den niedriglegierten Kaltarbeitsstahl 1.2235 (80CrV2). Die chemische Zusammensetzung des Stahls ist in der DIN EN 10132-4:2003-04 (Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung – Technische Lieferbedingungen – Teil 4: Federstähle und andere Anwendungen) genormt. Ein Auszug der, mittels OES gemessenen, chemischen Zusammensetzung der Kirschen Produkte aus 1.2235 (80CrV2), sowie die Norm-Zusammensetzung des 1.2235 (80CrV2) sind in Tabelle 1-4 zu sehen.

Tabelle 1-4: Auszug der chemischen Zusammensetzung der *Kirschen* Standard-Drechslerbeitel, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des niedriglegierten Kaltarbeitsstahls 1.2235 (80CrV2). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	V	Ni	Mo	Si	Mn	P	S
Drechslerbeitel, kurze Form (gemessen)	0,88	0,51	0,14	0,03	n.n.	0,27	0,54	0,012	0,008
Flachmeißel, gerade, einballig (gemessen)	0,88	0,50	0,13	0,02	n.n.	0,17	0,54	0,016	0,008
Ausdrehstahl, runde Schneide (gemessen)	0,84	0,49	0,13	0,03	n.n.	0,30	0,55	0,013	0,008
1.2235 (80CrV2)	0,75-0,85	0,40-0,60	0,15-0,25	max. 0,40	max. 0,10	0,15-0,35	0,30-0,50	max. 0,025	max. 0,025
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen									

Der gemessene Kohlenstoffgehalt des kurzen Drechslerbeitels und des Flachmeißels liegt mit 0,03 Masse-% leicht über der Obergrenze der Norm-Zusammensetzung. Der gemessene Vanadiumgehalt liegt bei allen *Kirschen* Standard-Drechslerbeiteln um 0,01 bzw. 0,02 Masse-% leicht unterhalb der Untergrenze der Norm-Zusammensetzung. Der gemessene Mangangehalt liegt bei allen *Kirschen* Werkzeugen um 0,04 bzw. 0,05 Ma.-% leicht über der Norm-Zusammensetzung. Alle anderen Gehalte liegen in den entsprechenden Grenzen.

Für die HSS-Drechslerbeitel bezieht *Kirschen* den Schnellarbeitsstahl 1.3343 (HS6-5-2C). Die chemische Zusammensetzung dieses Stahls ist in der DIN EN ISO 4957:2018-11 (Werkzeugstähle) genormt und in Tabelle 1-5 zu sehen.

Tabelle 1-5: Norm-Zusammensetzung des Schnellarbeitsstahls 1.3343 (HS6-5-2C). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	W	Mo	V	Si	Mn	P	S
HSS-Drechselbeitel (gemessen)	0,85	3,94	6,27	4,21	1,61	0,31	0,33	0,02	0,00
1.3343 (HS6-5-2C)	0,86-0,94	3,80-4,50	5,90-6,70	4,70-5,20	1,70-2,10	max. 0,45	max. 0,40	max. 0,030	max. 0,030
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen									

Freund-Produkte:

Freund bezieht das Pappreißmesser mit langer Klinge von einem Zulieferer. Ein Auszug der, mittels OES gemessenen, chemischen Zusammensetzung des Pappreißmessers mit langer Klinge ist in Tabelle 1-6 zu sehen. Die Zusammensetzung entspricht der des unlegierten Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U), dessen chemische Zusammensetzung in der DIN EN ISO 4957:2018-11 (Werkzeugstähle) genormt und ebenfalls in Tabelle 1-6 zu sehen ist.

Tabelle 1-6: Auszug der chemischen Zusammensetzung des *Freund* Pappreißmessers mit langer Klinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Si	Mn	P	S
Pappreißmesser lange Klinge (gemessen)	1,10	0,27	0,17	0,33	0,011	0,009
1.1545 (C105U)	1,00-1,10	-	0,10-0,30	0,10-0,40	max. 0,030	max. 0,030
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen						

Auch das Pappreißmesser mit kurzer Klinge bezieht *Freund* von einem Zulieferer. Ein Auszug der, mittels OES gemessenen, chemischen Zusammensetzung des Pappreißmessers mit kurzer Klinge ist in Tabelle 1-7 zu sehen. Die Zusammensetzung entspricht der des unlegierten Vergütungsstahls 1.0601 (C60), dessen chemische Zusammensetzung in der DIN EN ISO 683-1:2018-09 (Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil 1: Unlegierte Vergütungsstähle) genormt und ebenfalls in Tabelle 1-7 zu sehen ist.

Tabelle 1-7: Auszug der chemischen Zusammensetzung des *Freund* Pappreißmessers mit kurzer Klinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Vergütungsstahls 1.0601 (C60). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Si	Mn	P	S
Pappreißmesser kurze Klinge (gemessen)	0,65	0,21	0,25	0,66	0,014	0,008
1.0601 (C60)	0,57-0,65	max. 0,40	max. 0,40	0,60-0,90	max. 0,045	max. 0,045
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen						

Ein Auszug der, mittels OES gemessenen, chemischen Zusammensetzung des Pappreißmessers mit Hakenklinge ist in Tabelle 1-8 zu sehen. Diese entspricht der des Werkzeugstahls 1.2003 (75Cr1), dessen chemische Zusammensetzung in der DIN EN 10132-4:2003-04 genormt und ebenfalls in Tabelle 1-8 zu sehen ist.

Tabelle 1-8: Auszug der chemischen Zusammensetzung des *Freund* Pappreißmessers mit Hakenklinge, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des 1.2003 (Cr751). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Si	Mn	P	S	Al
Pappreißmesser Hakenklinge (gemessen)	0,81	0,32	0,28	0,76	0,02	0,01	0,00
1.2003 (75Cr1)	0,70 - 0,80	0,30 - 0,40	0,25 - 0,40	0,65 - 0,80	0,00 - 0,025	0,00 - 0,01	0,00 - 0,01
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen							

Ein Auszug der, mittels OES, ermittelten chemische Zusammensetzung des Ersatzmessers für die Knabber-Blechscherer von *Freund* ist in Tabelle 1-9 zu sehen. Diese ähnelt der Zusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.2360 (X48CrMoV8-1-1), welcher in der Stahl-Eisen-Liste definiert ist.

Tabelle 1-9: Auszug der chemischen Zusammensetzung des *Freund* Ersatzmessers für die Knabber-Blechscherer, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der definierten Zusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.2360 (X48CrMoV8-1-1). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
Ersatzmesser für Knabber-Blechscherer (gemessen)	0,48	7,50	1,29	1,26	0,8	0,43	0,010	0,007
1.2360 (X48CrMoV8-1-1)	0,45- 0,50	7,30- 7,80	1,30- 1,50	1,30- 1,50	0,70- 0,90	0,35- 0,45	max. 0,020	max. 0,005
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen								

Der Molybdän- und Vanadiumgehalt des Ersatzmessers der Knabber-Blechscherer liegt um 0,01 Ma.-% bzw. um 0,04 Ma.-%, leicht unterhalb des unteren definierten Grenzwertes. Der Schwefelgehalt ist um 0,002 Ma.-% höher als der obere Grenzwert.

Die chemische Zusammensetzung des Ersatzmesser für die Fassadenplattenschere Nr. 96, welches von *Freund* bereitgestellt worden ist, entspricht der des hochlegierten Kaltarbeitsstahls 1.2379 (X153CrMoV12) und somit dem gleichen Werkstoff, welchen *TKM* für die Ronden bezieht. Ein Auszug der gemessenen OES-Analyse, sowie die Norm-Zusammensetzung des 1.2379 sind in Tabelle 1-10 zu sehen.

Tabelle 1-10: Auszug der chemischen Zusammensetzung des *Freund* Ersatzmessers für die Fassadenplattenschere Nr. 96, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Norm-Zusammensetzung des hochlegierten Kaltarbeitsstahls 1.2379 (X153CrMoV12). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Mo	V	Si	Mn	P	S
Ersatzmesser für Fassadenplattenschere Nr. 96 (gemessen)	1,58	11,54	0,72	0,76	0,3	0,42	0,019	0,013
1.2379 (X153CrMoV12)	1,45- 1,60	11,0- 13,00	0,70- 1,00	0,70- 1,00	0,10- 0,60	0,20- 0,60	max. 0,030	max. 0,030
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen								

Die Ersatzklinge für den Dachbahnschneider wird von *Freund* ebenfalls von einem Zulieferer bezogen. Ein Auszug der, mittels OES gemessenen, chemischen Zusammensetzung ist in Tabelle 1-11 zu sehen.

Tabelle 1-11: Auszug der chemischen Zusammensetzung der *Freund* Ersatzklinge für den Dachbahnschneider, ermittelt mittels OES-Analyse, im Vergleich mit der Normzusammensetzung des Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U). Alle Angaben in Masse-%.

Elemente in Ma.-%	C	Cr	Si	Mn	P	S
Ersatzklinge Dachbahnschneider (gemessen)	1,12	0,24	0,25	0,46	0,013	0,007
1.1545 (C105U)	1,00- 1,10	-	0,10- 0,30	0,10- 0,40	max. 0,030	max. 0,030
*Tabellenwerte sind Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen						

Diese ähnelt der des unlegierten Kaltarbeitsstahls 1.1545 (C105U). Der gemessene Kohlenstoffgehalt liegt um 0,02 Ma.-% leicht über der Norm-Grenze des 1.1545. Der gemessene Mangengehalt liegt um 0,06 Ma.-% ebenfalls leicht über der Norm-Grenze.

Die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Hartmetall-Produkte von *Freund* (Plattenanreißer mit Hartmetall-Wechselklinge und Hartmetallrädchen für Bibermax II) mittels EDX-Analyse (Energiedispersive Röntgenspektrometrie) wurden nicht weiterverfolgt, da diese sich bei der finalen Auswahl der für den Repurpose-Prozess aufgrund ihrer Geometrie und Nachbearbeitung nicht eignen.

Auswahl geeigneter Produkte für das Repurposing

Kirschen verwendet für seine Drechselwerkzeuge zwei verschiedene Werkstoffe. Zum einen, den niedriglegierten Kaltarbeitsstahl 1.2235 (80CrV2) und, zum anderen, den Schnellarbeitsstahl 1.3343 (HS6-5-2C). Der hochlegierte Werkzeugstahl 1.2379 (X153CrMoV12) der *TKM*-Ronden könnte als Holzbearbeitungswerkzeug deutlich verschleißbeständiger sein als der 1.2235 (80CrV2). Des Weiteren könnte der 1.2379 (X153CrMoV12) eine ähnliche Standzeit erreichen, wie der 1.3343 (HS6-5-2C), den *Kirschen* bisher verwendet. Die Geometrie der Drechselwerkzeuge eignet sich hervorragend, um diese aus dem Flanschbereich der *TKM*-Ronden zu entnehmen. Drechselwerkzeuge von *Kirschen* sind daher potenzielle Repurposing-Produkte.

Auch die drei verschiedenen Pappreißmesser (lang, kurz, Haken) von *Freund* sind potenzielle Repurposing-Produkte. Der für die *TKM*-Ronden verwendete 1.2379 (X153CrMoV12) kann beim Anreißen von besandeten und beschieferten Bitumenbahnen deutlich verschleißbeständiger sein als die bisher verwendeten Kohlenstoffstähle 1.0601 (C60), 1.1545 (C105U) und 1.2003 (75Cr1). Aufgrund der Geometrie (schmal zulaufend) eignen sie sich hervorragend dafür, aus dem äußeren Rand der Ronde entnommen zu werden. Bei der finalen Auswahl und Umsetzung als Demonstrator wurde das Pappreißmesser mit Hakenklinge 1.2003 (75Cr1) gewählt. Damit wurde eine erfolgreiche Umsetzung demonstriert, die auch auf die beiden anderen Pappreißmesser-Typen angewandt werden kann.

Das Ersatzmesser der Knabber-Blechscherer von *Freund* ist ebenfalls ein potenzielles Repurposing-Produkt. Das *TKM*-Rondenmaterial 1.2379 (X153CrMoV12) kann möglicherweise auch beim Schneiden von Blechen bis 1,2 mm Blechdicke (0,6 mm Edelstahlblechen) verschleißbeständiger als der etwas niedriger legierte, bisher verwendete, Kaltarbeitsstahl 1.2360 (X48CrMoV8-1-1). Des Weiteren eignet sich das Ersatzmesser der Knabber-Blechscherer von *Freund* ideal dafür, um kleinere Bereiche, zwischen größeren Repurposing-Produkten, bei der Entnahme der Rohlinge auszufüllen. Bei der weiteren Umsetzung und Untersuchung wurde die Ersatzklinge der Knabber-Blechscherer nicht genauer betrachtet. Eine komplette Endfertigung der Demonstrator war durch den Bereitsteller Fa. Freund nicht möglich. So konnten zwar Rohlinge ausgeschnitten werden allerdings keine finalen Demonstratoren gefertigt werden.

Bei der Hartmetall-Wechselklinge des Plattenanreißers von *Freund*, handelt es sich um ein potenzielles Repurposing-Produkt. Die Klinge eignet sich, wie das Ersatzmesser der Knabber-Blechscherer, ebenfalls ideal dafür um kleinere Bereiche, zwischen größeren Repurposing-Produkten, bei der Entnahme von Rohlingen auszufüllen. Das verwendete Hartmetall ist zwar verschleißbeständiger als der 1.2379 (X153CrMoV12), dennoch sollte die Performance des hochlegierten Kaltarbeitsstahls beim Anreißen von Fassadenplatten und Dachziegeln untersucht werden. Eventuell kann das deutlich teurere Hartmetall bei nicht allzu großen Performanceeinbußen ersetzt werden. Auch hier konnten Rohlinge im Repurpose-Prozess erstellt werden, allerdings konnte eine finale Endbearbeitung durch Schleifen nicht durch die Fa. Freund umgesetzt werden. Der Aufwand, die Demonstratorrohlinge auf Maß zu schleifen, und die finale Schärfung der Schneide war nicht umsetzbar und ökonomisch.

Bei dem Ersatzmesser für die Fassadenplattenschere Nr. 96 von *Freund*, welches aus dem gleichen hochlegierten Kaltarbeitsstahl 1.2379 (X153CrMoV12) wie die *TKM*-Ronden gefertigt wird, hat sich im Laufe des Projektes herausgestellt, dass es sich aufgrund der Geometrie nicht als potenzielles Repurposing-Produkt eignet. Mit einer Länge von 800 mm ist das Messer zu lang um aus einer 611er Ronde, welche über 90 % der Jahresproduktion von *TKM* ausmacht, entnommen zu werden. Eine mögliche Segmentierung des Messers ist nach derzeitigem Wissensstand technisch nicht umsetzbar.

Die Ersatzklinge für den Dachbahnschneider von *Freund*, welche aktuell aus einem 1.1545 (C105U) gefertigt wird, eignet sich aufgrund seiner Geometrie ebenfalls nicht als Repurposing-Produkt im Rahmen des CoT-Projektes. Zwar könnte der 1.2379 (X153CrMoV12) von *TKM* beim Schneiden von Dachbahnen deutlich verschleißbeständiger sein als der bisher verwendete Werkstoff. Aber da die Klinge eine Blechdicke von $t = 0,4$ mm benötigt, ist ein Repurposing von fertigungstechnischer Seite auch mit Nachbearbeitung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht umsetzbar.

Das Hartmetall-Rädchen für den Bibermax II von *Freund* ist aufgrund seiner Geometrie ebenfalls aus fertigungstechnischen Gründen als potenzielles CoT-Projekt nicht umzusetzen.

Gefügeuntersuchungen

Nach der Auswahl passender Produkte für das Repurposing und mit den ermittelten chemischen Zusammensetzungen wurden Zustands- und Phasenmengenschaubilder der ausgewählten Produkten der Firmen Kirschen und Freund erstellt. Sie stellen die Gefügezustände im Gleichgewicht dar. Mit den bekannten Härte- und Anlasstemperaturen konnten die Schaubilder, die die Gefügephasen in den Werkstoffen abbilden, interpretiert werden. Für die Darstellung der Phasendiagramme und Phasenmengenschaubilder wurden nur die Werkstoffe herangezogen, die im Repurpose-Prozess umgesetzt wurden. Diese waren der Werkstoff der Kreismesser (X155CrMoV12; 1.2379), der Stechbeitel mit den Werkstoffen 80CrV2 (1.2235) und HSS6-5-2C (1.3343) sowie des Pappreißmessers mit Hakenklinge (75Cr1; 1.2003). Abbildung 1-9 ist das Phasendiagramm und das -mengenschaubild des X155CrMoV12 (1.2379), in Abbildung 1-10 des Werkstoffs 80CrV2 (1.2235), in Abbildung 1-11 des Werkstoffs HSS6-5-2C (1.3343) und in Abbildung 1-12 des Werkstoffs 75Cr1 (1.2003) dargestellt.

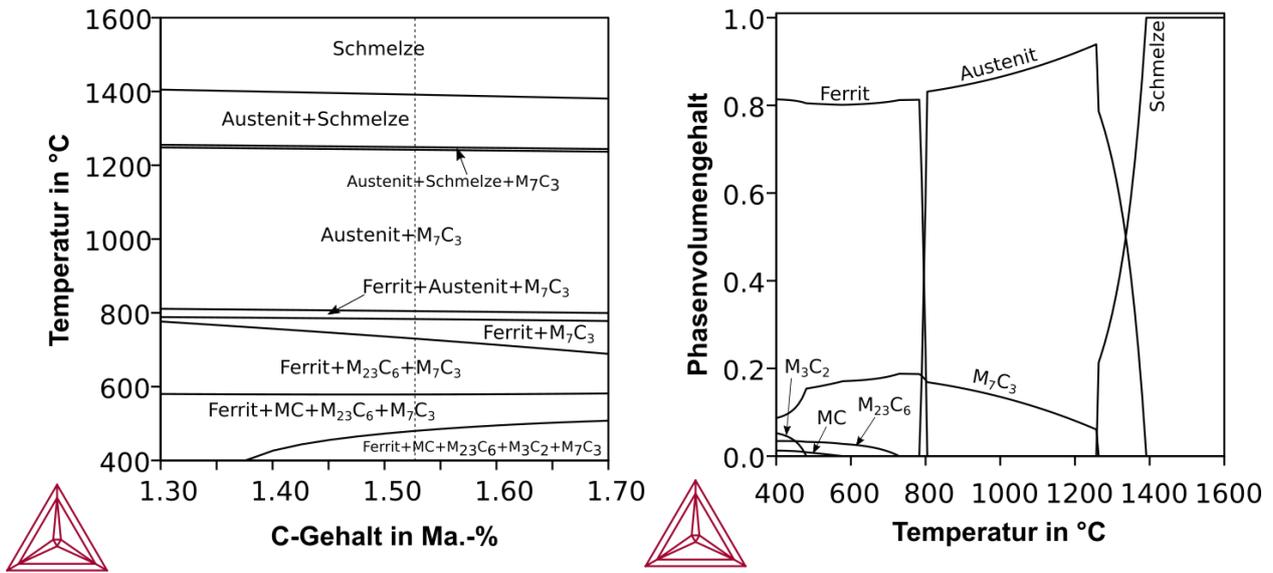


Abbildung 1-9: Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs X15CrMoV12 (1.2379). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.

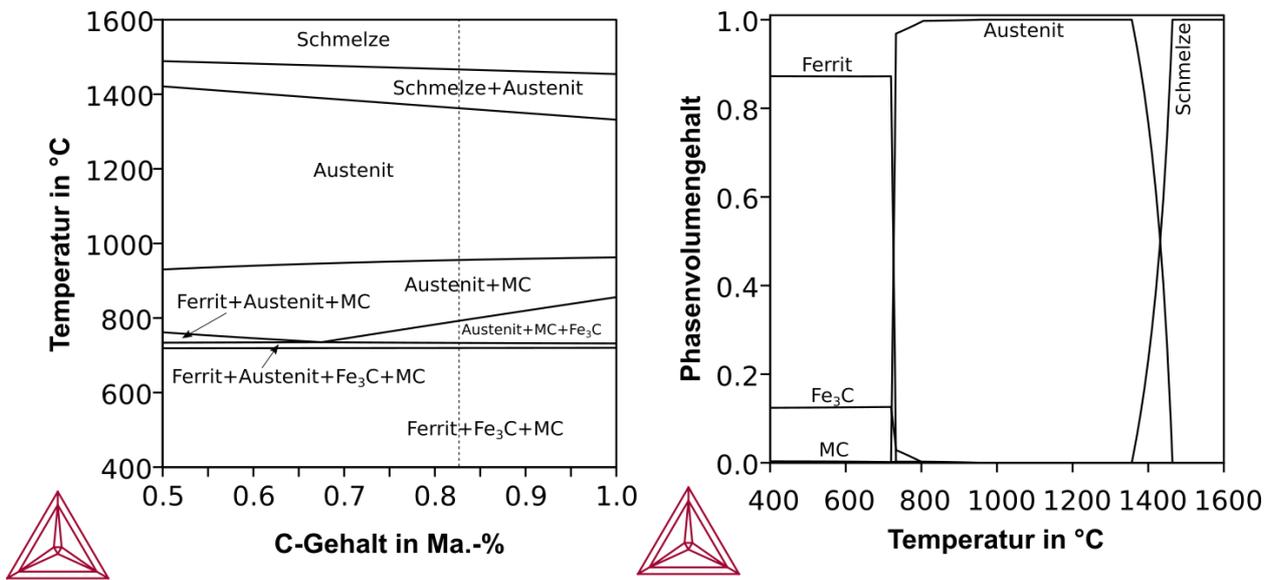


Abbildung 1-10: Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs 80CrV2 (1.2235). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.

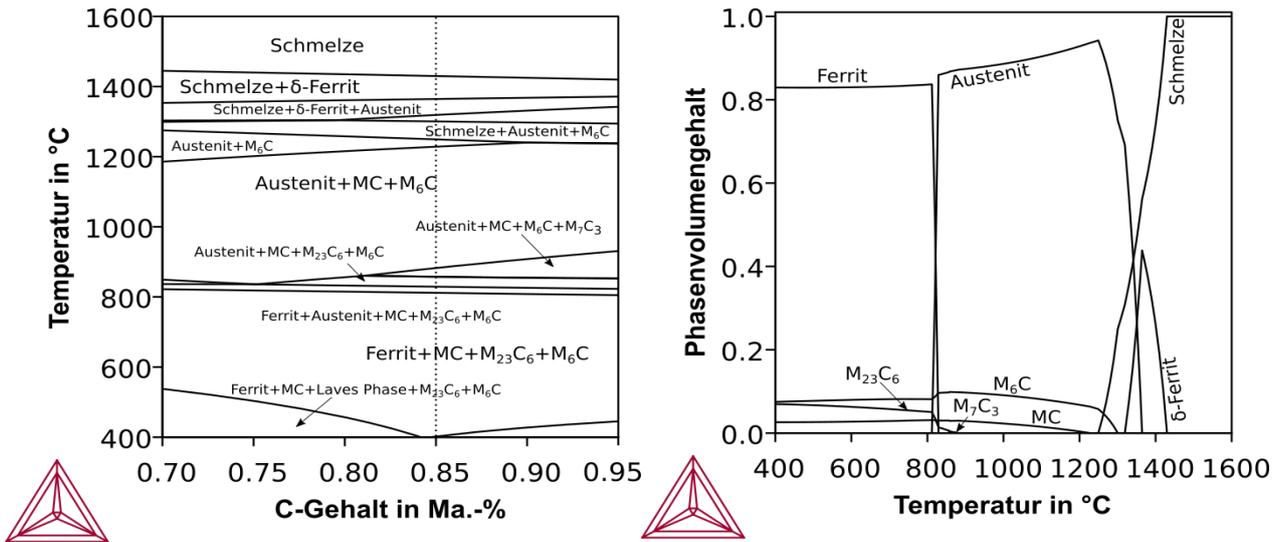


Abbildung 1-11: Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs HSS6-5-2C (1.3343). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.

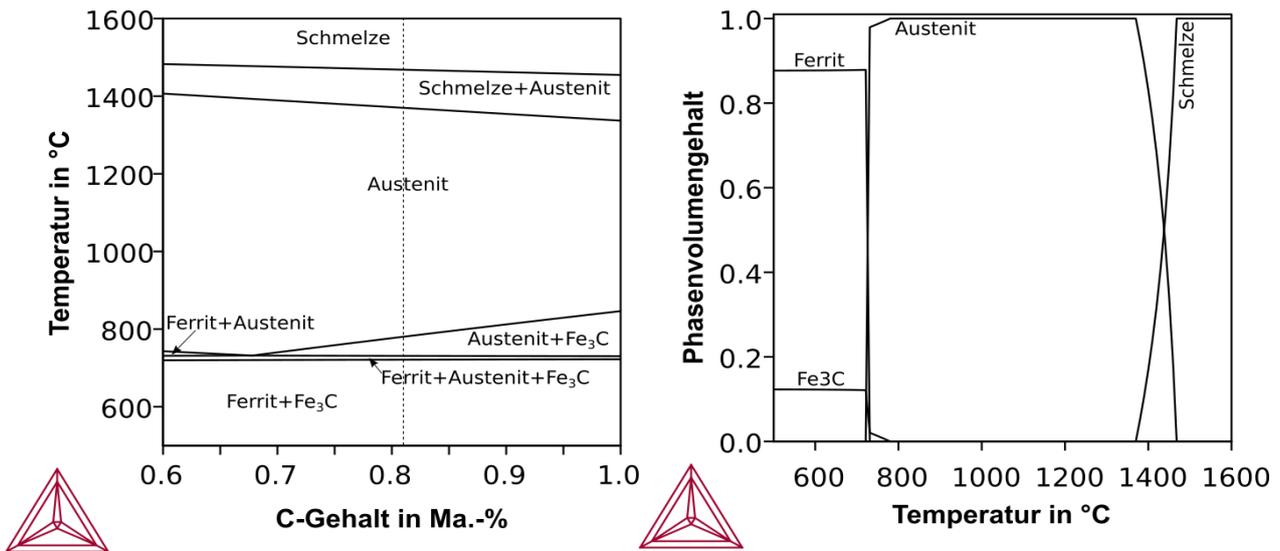


Abbildung 1-12: Phasendiagramm (links) und Phasenmengenschaubild (rechts) des Werkstoffs 75Cr1 (1.2003). Die gestrichelte Linie im Phasendiagramm kennzeichnet den C-Gehalt.

Mit den verwendeten Härte- und Anlasstemperaturen der Fa. TKM, Fa. Kirschen und Fa. Freund konnten somit die bei der jeweiligen Temperatur vorherrschenden Gefüge im Gleichgewichtszustand abgeschätzt werden. Des Weiteren wurden Probenstücke aus den Werkzeugen herausgetrennt, um metallographische Schliffe daran durchzuführen. Mit den präparierten Proben konnten dann die Gefügeaufnahmen im Ist-Zustand aufgenommen werden. Es wurden Gefügeaufnahmen am Lichtmikroskop (LiMi) durchgeführt. Die Aufnahmen visualisieren die Gefügestände und dienen als Referenz für nachfolgende Untersuchungen an verschlissenen Handwerkzeugen bzw. gefertigten Demonstratoren. Abbildung 1-13: zeigt die lichtmikroskopischen Gefügeaufnahmen im Ist-Zustand des Gefüges eines Maschinenkreismesser aus dem Werkstoff X155CrMoV12 (1.2379).

Von den ausgewählten Repurposing-Produkten wurden metallische Schriffe angefertigt. Anschließend wurden Aufnahmen der Gefüge mit einem Auflichtmikroskop DM 2700M der Fa. Leica (mit der Mikroskopsoftwareplattform Leica Application Suite (LAS) Version 4.6.2) an der *BUW* im Werkstofflabor in Solingen aufgenommen.

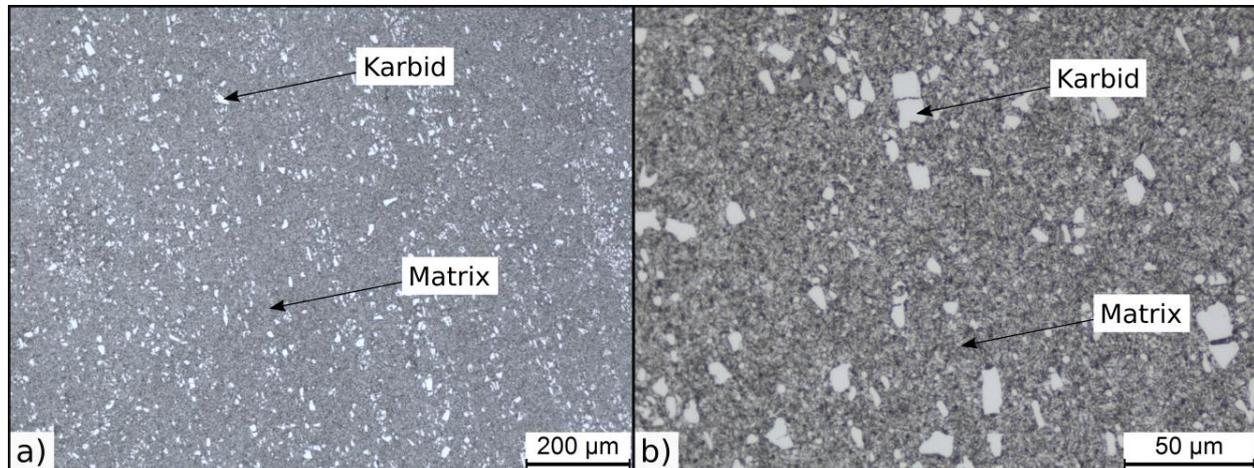


Abbildung 1-13: Lichtmikroskopische Aufnahme des Gefüges des *TKM* Kreismessers. Probenmaterials im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 100-facher Vergrößerung und b) 500-facher Vergrößerung.

Im Gefüge des Kreismessers sind grobe und feine Karbidausscheidungen vom Typ M_7C_3 vorhanden und eine angelassene martensitische Matrix. Mit den Phasendiagramm und den bekannten Härte- und Anlasstemperatur der Herstellungsrouten konnte die vorherrschenden Phasen aus Abbildung 1-9 angenommen werden. In Abbildung 1-13: a) ist eine Karbidzeiligkeit der groben M_7C_3 -Karbide zuerkennen. Diese entsteht durch den Walzprozess bei der Rohteilherstellung der Ronde. Die Vorzugsrichtung der Karbide kann im späteren Verlauf des Projekts für den Repurposingprozess relevant sein. Speziell bei der Betrachtung der im Eingriff befindlichen Schneidbereiche der Handwerkzeuge kann die Ausrichtung der Karbide innerhalb der Schneide einen Einfluss auf den Verschleißwiderstand und somit auf die Standzeit der Repurposeprodukte haben. Selbes Vorgehen diente für die Untersuchung der anderen Werkstoffe (Abbildung 1-14 bis Abbildung 1-16).

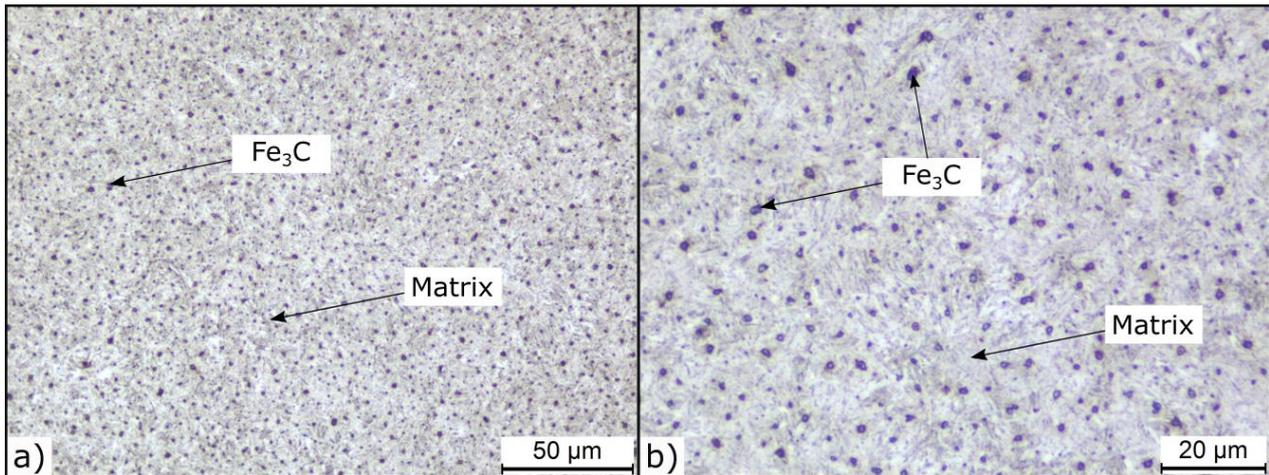


Abbildung 1-14: Lichtmikroskopische Gefügaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel 80CrV2 (1.2235) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.

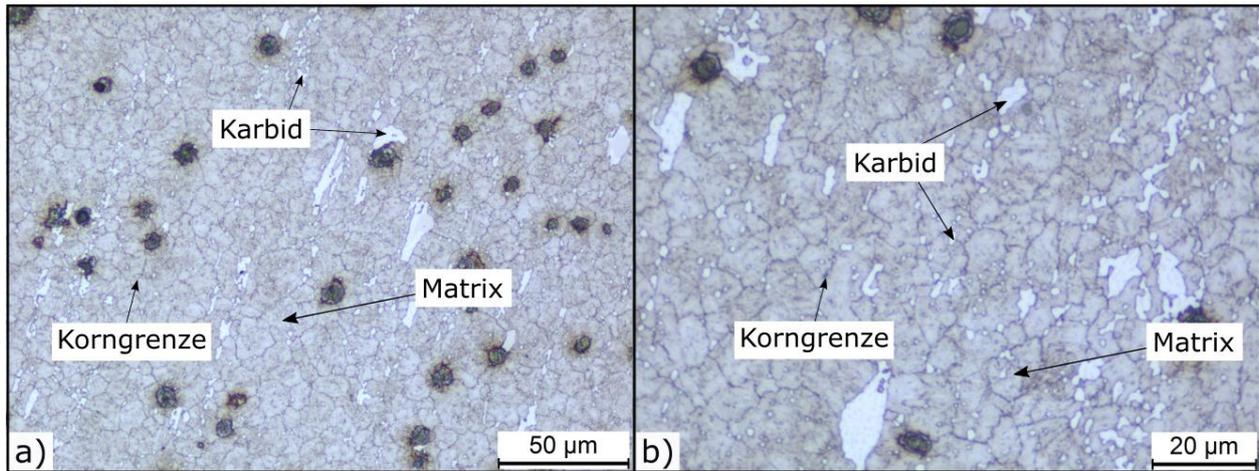


Abbildung 1-15: Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel HSS6-5-2C (1.3343) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.

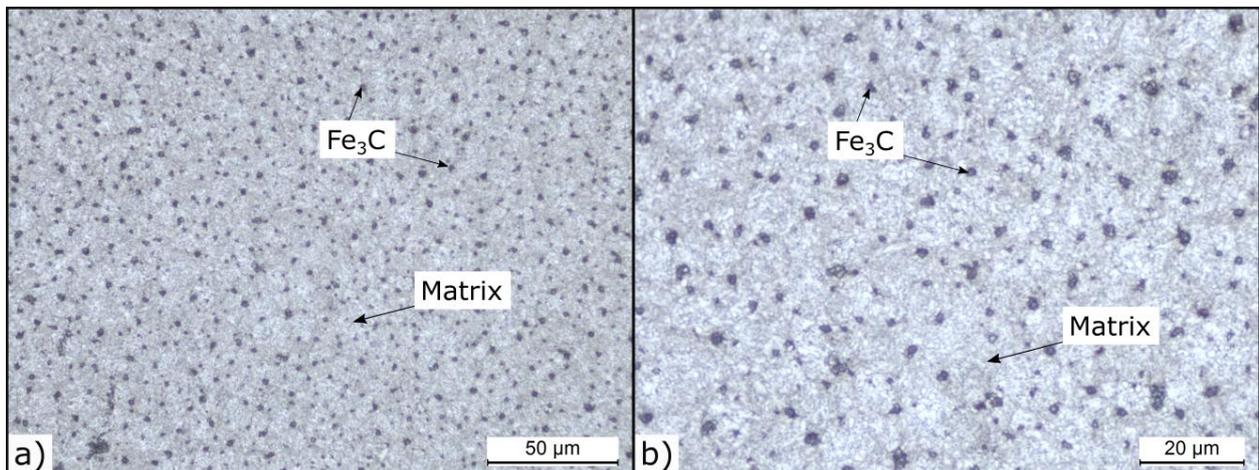


Abbildung 1-16: Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Probenmaterials vom Stechbeitel 75Cr1 (1.2003) im gehärteten und angelassenen Zustand bei a) 500-facher Vergrößerung und b) 1000-facher Vergrößerung.

Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507)

Ein weiterer Kennwert bei der Aufnahme der Ist-Zustände waren die Härtewerte der Materialien, welche für den Repurpose-Prozess ausgewählt wurden. Die ermittelten Härtewerte sind in Abbildung 1-17:dargestellt. Zur Ermittlung der Härte aller potenziellen Repurposing-Produkte wurden an der *BUW* Härteprüfungen nach Vickers (genormt in der DIN EN ISO 6507) mit einem vollautomatisierten Härteprüfer Carat 930 der Firma *ATM* durchgeführt. Die Prüfkraft F betrug 98,07 N (HV10).

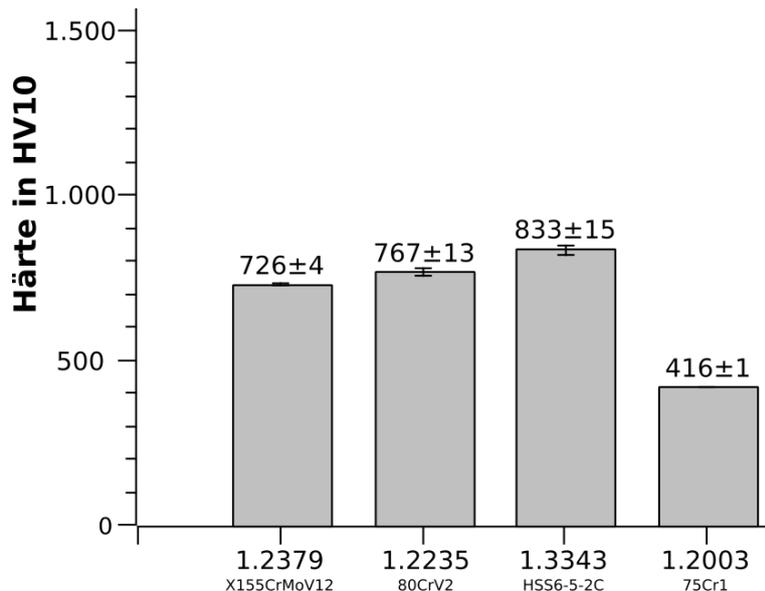


Abbildung 1-17: Ermittelte Härtewerte der verwendeten Werkstoffe der ausgewählten Repurpose-Produkte in HV10.

Das *TKM* Probenmaterial (1.2379, X153CrMoV12) hat nach der Wärmebehandlung eine Härte von 726 ± 4 HV10, was näherungsweise 61 HRC (Rockwellhärte – C) entspricht. Die *Kirschen* Werkzeuge aus 1.2235 (80CrV2) weisen nach ihrer Wärmebehandlung Härtewerte von ca. 767 ± 13 HV10 auf, was in etwa der Härte des *TKM* Probenmaterials entspricht. Der Schnellarbeitsstahl-Meißel von *Kirschen*, mit einer Härte von 833 ± 15 HV10 (entspricht näherungsweise einer Härte von 63-64 HRC) und ist somit etwas härter als das Probenmaterial von *TKM*. In den oben genannten Fällen sind die ermittelten Härtewerte typisch für die jeweiligen Stähle im gehärteten und angelassenen Zustand. Das *Freund* Pappreißmesser mit Hakenklinge weist eine Härte von ca. 416 ± 1 HV10 auf und ist somit deutlich weicher als der Repurpose-Werkstoff der Kreismesser X155CrMoV12 (1.2379). Um die Produkte und die Anwendung derer besser zu verstehen, wurden eigene Anwendungstest durchgeführt. Nach Interviews mit Dachdeckern und Drechslern wurden die Produkte im Labormaßstab benutzt, um die in der Anwendung relevanten Bereiche und Schneiden der Handwerkzeuge identifizieren zu können. Auf Basis der erlangten Kenntnisse wurden die definierten Schneidbereiche bildanalytisch festgehalten und die Originalkonturen mittels optische 3D-Vermessung aufgenommen.

In der ursprünglichen Projektplanung war es vorgesehen, von Endkunden der beteiligten Firmen verschlissene Produkte zurückzuholen und diese weiteren experimentellen Untersuchungen zu unterziehen. Aufgrund der durch die Coronapandemie verursachten Kontaktbeschränkungen sowie die Verlagerung von Tätigkeiten in das Home-Office stand Material in viel geringerem Umfang zur Verfügung als geplant. Infolgedessen konnten dem FUW kein Material bereitgestellt werden. Das verfügbare Material bei *TKM* wurde intern für den im folgenden beschriebenen Prozess des Remanufacturings eingesetzt.

1.2 Arbeitspaket 2 – Re-Manufacturing

1.2.1 Konzept und Herstellung von Kreismesser-Demonstratoren

Das Arbeitspaket 2 hatte zum Ziel, aus verschlissenen Kreismessern durch eine Überarbeitung ein Kreismesser für die erneute Verwendung herzustellen. Die Kreismesser sind nach Ihrem Einsatz im Durchmesser erheblich geschrumpft, was durch das regelmäßige Nachschleifen in der

Produktionsmaschine geschieht. Die bei *TKM* hergestellten Kreismesser mit dem kleinsten Anfangsdurchmesser von 611 mm kommen für ein Remanufacturing nicht in Frage, da es keine Einsatzmöglichkeit für noch kleinere Kreismesser gibt. Stattdessen finden diese Kreismesser Ihre Verwendung im Repurposing, was im Kapitel 1.3 detailliert erläutert wird.

Für das Remanufacturing kommen damit nur die größten Kreismesser in Frage, die im Neuzustand einen Durchmesser von $D = 1001$ mm aufweisen. Diese können verwendet werden um die nächstkleineren Kreismesser mit einem Nenndurchmesser von $D = 871$ mm herzustellen. Die aufzuarbeitenden Kreismesser weisen einen Durchmesser von 900 – 925 mm auf.

Als Fertigungsverfahren zur Anpassung auf die Zielgeometrie wurde ein trennendes und spanendes Fertigungsverfahren geplant. Als Trennverfahren kamen aufgrund der weiterhin hohen Härte des Werkzeugstahls Wasserstrahlschneiden und Laserstrahlschneiden in Frage. Danach erfolgte die Fertigbearbeitung durch Schleifen (siehe Abbildung 1-18:).

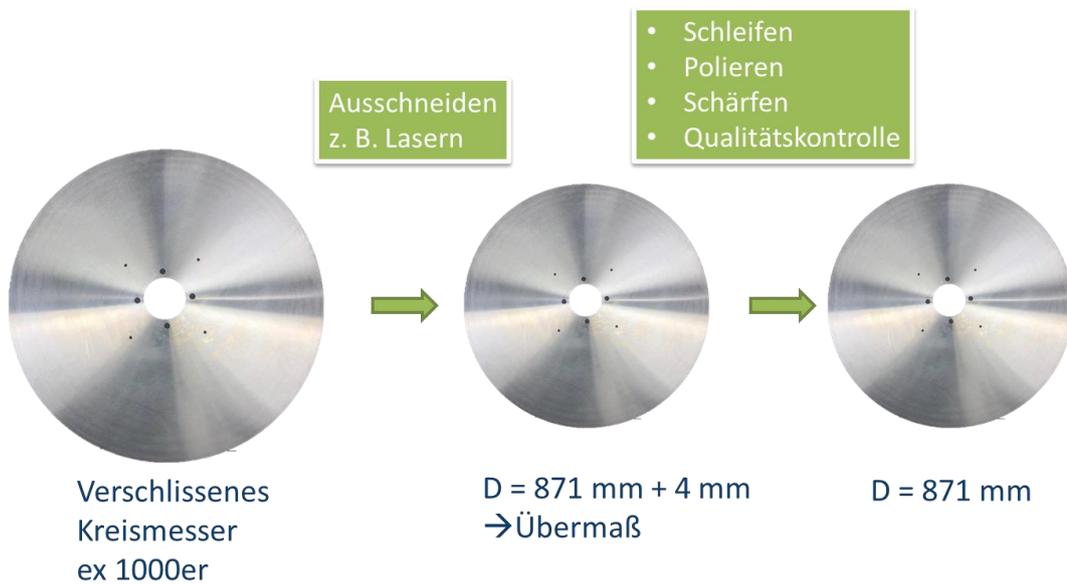


Abbildung 1-18: Bearbeitungskonzept Remanufacturing von Kreismessern (Foto: Hagedorn)

Bei den ersten Versuchen mit dem Wasserstrahlschneiden brachen die Ronden während der Bearbeitung. Das liegt darin begründet, dass durch den Wasserstrahl eine ungünstige mechanische Belastung auf das Kreismesser ausgeübt wird, das zudem im Vergleich zu niedriglegiertem Stahl ein spröderes Verhalten aufweist. Laserstrahlschneiden hingegen war möglich, jedoch musste der auszuschneidende Durchmesser ca. 4 mm größer eingestellt werden, damit der spätere Schneidbereich außerhalb der Wärmeeinflusszone vom Laserschneiden liegt.

Die veränderte Ausgangsgeometrie machte weitere Anpassungen der automatisierten Schleifprozesse notwendig. Eine Ursache für die schwierigere Schleifbearbeitung besteht darin, dass die relativ dünnwandigen Kreismesser in der Wate konisch und im Bundbereich eben sind. Der Spannmagnet in der Schleifmaschine ist jedoch nur eben und es kommt bei der Bearbeitung zu Abweichungen zwischen einem theoretisch ideal aufliegendem Kreismesser und dem, wie es tatsächlich zu dem Magneten gezogen wird. In einigen Bereichen gibt es einen minimalen Spalt, der zunächst zu unerwünschten geometrischen Abweichungen führte. Diese genannten Probleme machten iterative Anpassungen und Optimierungen der Schleifprogramme notwendig.

Abbildung 1-19 zeigt die Demonstrator-Kreismesser nach einer schleifenden Teilbearbeitung.



Abbildung 1-19: Demonstrator-Kreismesser nach der Bund- (links) und nach der Watenbearbeitung (rechts)

1.2.2 Bewertung der Demonstratoren

Im letzten schleifenden Bearbeitungsschritt, dem Scharfschleifen, werden in dem Bearbeitungszentrum diverse Qualitätsmerkmale messtechnisch aufgenommen, die der Endkontrolle des Produktes dienen. Die Remanufacturing-Produkte erwiesen sich ohne Einschränkung als qualitativ gleichwertig gegenüber Kreismessern aus konventioneller, „linearer“ Fertigung.

1.2.3 Geschäftsmodellentwicklung

Für die Entwicklung eines marktfähigen Geschäftsmodells wurde zunächst die methodische Vorgehensweise erarbeitet und anschließend die ersten Untersuchungen durchgeführt. Sowohl für die Entwicklung des Geschäftsmodells für Remanufacturing als auch für Repurposing war die methodische Vorgehensweise gleich. Die grundlegende Methodik ist das Business Model Canvas (BMC) (Osterwalder & Pigneur, 2011). Da der Entwicklungsprozess jedoch nicht ergebnisoffen ist, sondern das Zielszenario durch das Projekt definiert ist – Implementierung von Remanufacturing und Repurposing, wurde auf diverse Kreativprozesse zur Ideenfindung verzichtet. Stattdessen fand das BMC erst Anwendung für das IST Szenario, also die aktuelle lineare Produktion, und dann auf die SOLL-Szenarien, also die zirkuläre Produktion im Sinne von Remanufacturing und Repurposing. Durch den Abgleich der IST und SOLL Szenarien zeigen sich dann die wesentlichen Unterschiede und die Bereiche der Handlungsmöglichkeiten. Darauf baut die Untersuchung und Ableitung von Gestaltungsmaßnahmen auf.

Das BMC ist eigentlich in Form von interaktiven Veranstaltungsformaten mit einer Mehrzahl an Mitarbeitenden, die verschiedene Perspektiven des Unternehmens abdecken, zu erarbeiten. Aufgrund der Pandemie war das so nicht möglich. Stattdessen wurde auf Basis von bereits erfassten Daten und Informationen, die durch vorige Begehungen, Dialoge und den Prozess der Primärdatenerhebung ausreichend vorhanden waren, ein erstes BMC für das IST Szenario erarbeitet. Dann erfolgte eine mehrteilige Diskussion und Anpassung des Modells mit dem Projektpartner TKM. Das BMC für das SOLL Szenario wurde ähnlich erarbeitet. Dabei wurde gemeinsam am webbasierten Sustainable Business Canvas von start green gearbeitet (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit,

2021). Die Webseite stellt weitere Informationen und Fragestellungen zur Verfügung, sodass die Entwicklung möglichst ganzheitlich geschieht. Auch wenn es sich dabei um das Sustainable Business Model Canvas als Variante des ursprünglichen BMC handelt, lag der primäre Fokus auf der ökonomischen Perspektive. Durch den Abgleich der IST- und SOLL-Szenarien wurden Themenfelder identifiziert, die weitere Untersuchungen mit sich ziehen und für die Lösungsansätze entwickelt werden. Die dargestellten Resultate in der Tab. 2-3 ergeben sich aus der ersten Auswertung des BMC. Hier knüpft das Erarbeiten von Handlungsempfehlungen zu den jeweiligen Problemstellungen an.

Tab. 2-3 Auswertung des Business Model Canvas für das SOLL-Szenario des Remanufacturings

BMC-Baustein	Resultat
Kunden	<ul style="list-style-type: none"> - Geringer Anteil am gesamten Kundestamm - Erschließung Kundestamm mit Offenheit für Reman-Ware - Akquise von Neu- oder Bestandskunden – Verringerung Einkauf Rohprodukte oder Absatzsteigerung
Nutzenversprechen	<ul style="list-style-type: none"> - Erleichterung der Entsorgung - erhöhte Ressourceneffizienz und ökologische Vorteilhaftigkeit - Sicherung der Produktfunktionalität und -qualität - Kommunikation der nachhaltigkeitsbezogenen Aspekte durch den Einbezug aktueller und erwarteter politischer Aktivitäten (Pflichten, Leitlinien, Zertifizierungsmöglichkeiten)
Schlüsselaktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Veränderte Logistik- und Produktionsprozesse - Ausreichend interne und externe technische Kompetenz vorhanden - Rückholprozesse sind hinsichtlich Ausschlusskriterien (Distanz, Kosten, rechtlicher Rahmen, Umsetzbarkeit auf Kundenseite etc.) zu untersuchen
Schlüsselressourcen	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der Anforderungen für die Qualität der zurückgeholten Maschinenkreismesser und mögliche Probleme in der Verarbeitung - Prüfung und Bewertung möglicher Konsequenzen (Reputation, Ausschussrate, Wirtschaftlichkeit etc.) - Entwicklung von Lösungsansätzen
Schlüsselpartnerschaften	<ul style="list-style-type: none"> - Einbezug und Kooperation mit Mitgliedern entlang der Wertschöpfungskette ist positiv zu bewerten - Arbeitsweise im Rahmen des Forschungsprojekts führt zur ganzheitlichen Betrachtung und erweitert Informations- und Wissenslage
Wettbewerb	<ul style="list-style-type: none"> - Durch das Geschäftsmodell stellt sich TKM in die unerwünschte Konkurrenz zu Schrotthändlern - Durch die geographische Streuung der Kunden respektive deren Schrotthändlern und dem geringen Schrottvolumen der 1000er Ronden ist fraglich, ob der Konkurrenzdruck spürbar ist - Ein erneuter Austausch mit Schrotthändlern bzgl. der mengenmäßigen und ökonomischen Bedeutung des Abfallstroms wäre hier aufschlussreich
Ertragsmodell	<ul style="list-style-type: none"> - Das Ertragsmodell für die Reman-Ware kann unabhängig gestaltet werden, da keine Anforderungen an die EoL-Phase bestehen - Für die 1000er Maschinenkreismesser ist jedoch ein alternatives Ertragsmodell auszuarbeiten, da diese rückgeholt werden - Dabei müssen Faktoren wie die Abfalldeklaration, aber auch die Kundenperspektive berücksichtigt werden

Kostenstruktur	<ul style="list-style-type: none"> - Unterscheidung in einmalige Investition für Umstellung und Entwicklung der Prozesse - Umgang mit Verlustfaktor – Vergleich zu aktueller Verlustrate, mögliches Entgegenwirken oder Ausgleich durch Partnerschaft mit Schrotthändler - Kosten-/Preisgestaltung für den Ankauf der verschlissenen Ronden
----------------	--

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Implementieren des Remanufacturings auf die Kunden der 871er und 1000er Ronden wirkt. Zur Gestaltung eines erfolgreichen Geschäftsmodells muss das Nutzenversprechen erarbeitet und nach extern kommuniziert werden. TKM muss sich zudem entscheiden, ob die Reman-Ware ergänzend oder ersetzend angeboten wird. Das hat vielseitige Auswirkungen z.B. auf die Kundenakquise, den Einkauf, den Vertrieb und das Controlling. Das Unternehmen verfügt über gute technische Kompetenz – intern und extern, was für die Umstellung des Produktionsprozesses grundlegend ist. Der Rückholprozess sollte in enger Zusammenarbeit mit den Kunden entwickelt werden, damit ein Mehrwert entsteht. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Rückholungsprozess für die Kunden nicht machbar und/oder unattraktiv ist und sie die Ronden weiterhin als Schrott verkaufen. Die Ergebnisse einer ökonomischen und ökologischen Analyse bilden die Basis für den Unique Selling Proposition (USP) der Reman-Ware. Die Prüfung der Qualitätsanforderungen der genutzten Messer und die Rechtmäßigkeit der Wiederverarbeitung sind grundlegend. Die Veränderung des Ertragsmodells ist ebenfalls von Bedeutung, denn es kann zu einer Verbindlichkeit und Versorgungssicherheit führen. Möglicherweise ist es auch eine Gestaltungsmöglichkeit zur Gewährleistung der Rechtmäßigkeit.

Einige Themenpunkte wie z.B. die Gestaltung des Rückholprozesses spiegeln sich in mehreren Bausteinen des BMCs wider. Möglicher positiver wie auch negativer wechselseitiger Einfluss ist beim Entwickeln von Handlungsempfehlungen zu berücksichtigen. Als Beispiel kann die Umstellung des Ertragsmodells vom einmaligen Verkauf des Produkts auf den Verkauf von Leistung sein, um die Rückholung zu ermöglichen. Das bietet die Möglichkeiten Anforderungen auf Prozessebene wie das Handling der verschlissenen Ronden vertraglich festzuhalten und so Herausforderungen hinsichtlich des Qualitätsverlust und des Handlings bei TKM zu adressieren.

Aus der Untersuchung ergeben sich Gestaltungsmöglichkeiten, und zwar für alle BMC Bausteine, die sich durch die Implementierung der zirkulären Strategien verändern. Die wesentlichen Bausteine – Schlüsselressourcen, Nutzenversprechen, Ertragsmodell und Kostenstruktur, resultieren in 5 wesentlichen Handlungsfeldern: (1) Rechtmäßigkeit, (2) Ertragsmodelle, (3) Nachweismöglichkeiten, (4) ökonomische und (5) ökologische Analyse. Die Handlungsfelder ergeben sich gleichermaßen aus der Geschäftsmodellentwicklung für Repurposing. Entsprechend erfolgt die weitere Untersuchung gebündelt und wird im Kapitel 1.3.3 thematisiert. Die ökonomische und ökologische Analyse erfolgt in den vorgesehenen separaten Arbeitspaketen (AP5, Kapitel 1.4.2).

1.3 Arbeitspaket 3 – Repurposing

1.3.1 Konzept und Herstellung der Handwerkszeug-Demonstratoren

Auf Basis der in Arbeitspaket 1 ermittelten Ist-Zustände und Erkenntnisse, wurde ein Konzept für das Repurposing erstellt. Als Ausgangsmaterial für das Repurposing können verschiedene Produkte verwendet werden. Zum einen können während der Fertigung Produktionsabfälle anfallen, bspw. während des Härteprozesses oder der späteren spanenden Bearbeitung. Hauptaugenmerk liegt aber auf den verschlissenen 611er Maschinenkreismessern der Firma *TKM*, die nach der Nutzungsphase von den Anwendern zurückgeholt werden sollen. Für den Prozess wurde das Maschinenkreismesser mit einem 611er Durchmesser ausgewählt. Dabei handelt es sich um das Produkt mit dem höchsten

Absatz und größten Massenstrom. Auch ist das Remanufacturing ausgeschlossen, da es sich bereits um das kleinste Produkt handelt. Die Auswahl erfolgte auch auf Grundlage der Geometrie und Materialdicke der Maschinenkreismesser. Das Maschinenkreismesser hat einen breiten Bundbereich und die kleinste Innenbohrung gegenüber den anderen Varianten (Abbildung 1-20). Mit einer Blechdicke von $t_{\max} = 5$ mm eignen sich diese Variante der Kreismesser gut, um die vom Projektkonsortium ausgewählten Produkte der Fa. *Kirschen* und *Freund* aus diesem zu fertigen. Die Handwerkzeuge besitzen Materialstärken zwischen 2 und 5 mm. Bei der Aufnahme des Ist-Zustands wurde die bereits beschriebene vorherrschende Karbidzeiligkeit im Gefüge der Kreismesser aufgezeigt.

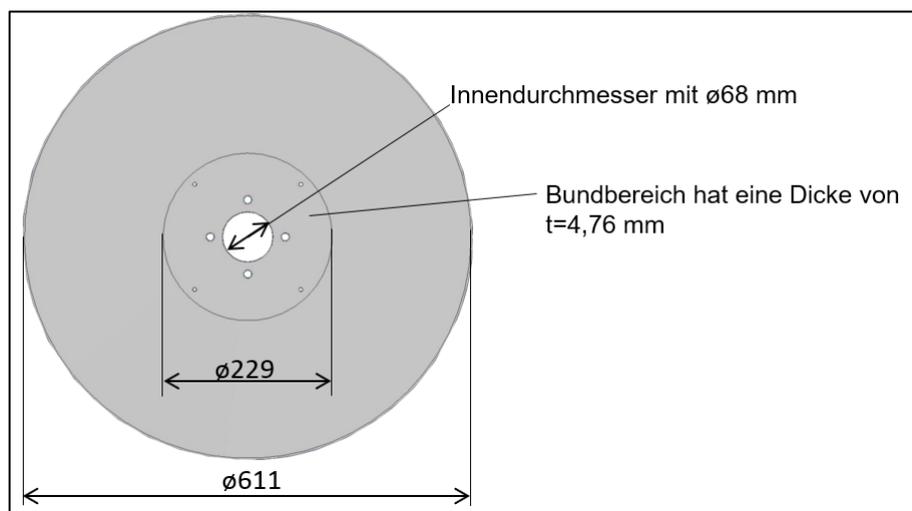


Abbildung 1-20: Schematische Darstellung eines 611er Maschinenkreismessers und seiner Abmessungen.

Die durch das Kreuzwalzen in der Rohteilherstellung eingestellte Vorzugsrichtung der Karbide lässt einen Einfluss auf die Qualität und Standzeit der Demonstratoren vermuten. Je nachdem wie die Karbide im geschliffenen Schneidbereich der Produkte liegen, können diese früher aus der Matrix herausbrechen (Abbildung 1-21) und somit die Schneid- und Schnitthaltigkeit beeinflussen. Aus diesem Grund wird im Konzept eine ambulante metallographische Gefügeanalyse berücksichtigt. Bei der Vorgehensweise der ambulanten Metallographie wird mit Hilfe einer Celluloseacetatfolie das Negativ der Gefügebestandteile abgenommen und kann so unter dem Lichtmikroskop sichtbar gemacht werden. Durch die zerstörungsfreie Gefügeanalyse kann die Vorzugsrichtung der Karbide innerhalb der Kreismesser festgestellt werden und die Anordnung der auszuschneidenden Rohlinge dementsprechend angepasst werden. Die Anordnung der Bauteile soll zu einer maximalen Materialausnutzung führen.

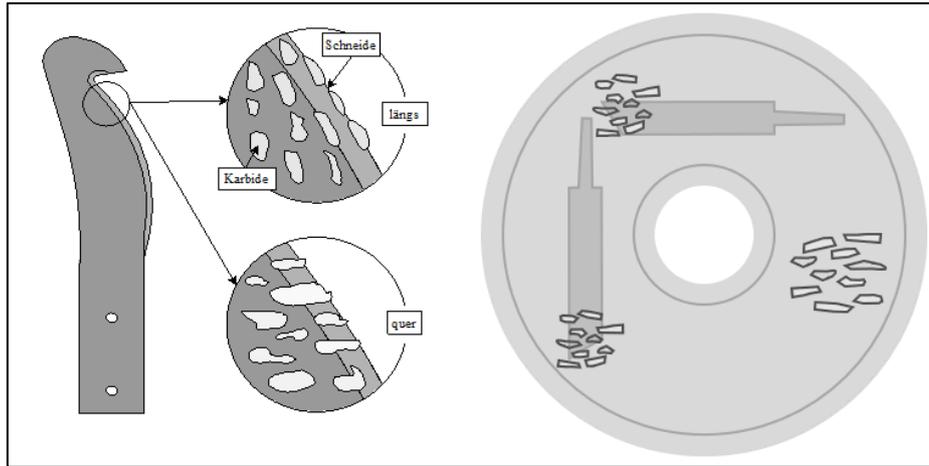


Abbildung 1-21: Beispielhafte Darstellung der Vorzugsrichtung der Karbide innerhalb des Schneidenbereichs eines Repurpose-Pappreißmessers mit Hakenklinge. Oben "längs" zur Schneide, unten "quer".

Um eine möglichst hohe Materialausnutzung gewährleisten zu können, müssen die verschlissenen Ronden hierfür neben der Feststellung der Karbidzeitigkeit auch auf deren aktuellen Durchmesser charakterisiert werden. Der Durchmesser beeinflusst dabei die maximale Ausnutzung der Kreisrunde für die Anordnung von Repurpose-Produkten. Eine beispielhafte Darstellung eine optimale Anordnung verschiedener Repurpose-Rohlinge in einem verschlissenen Kreismesser ist in Abbildung 1-22 dargestellt. In beiden Schnittmustern wird jeweils die Ausrichtung der Rohlinge in Längs- und Querrichtung zur Gefügezeitigkeit berücksichtigt.

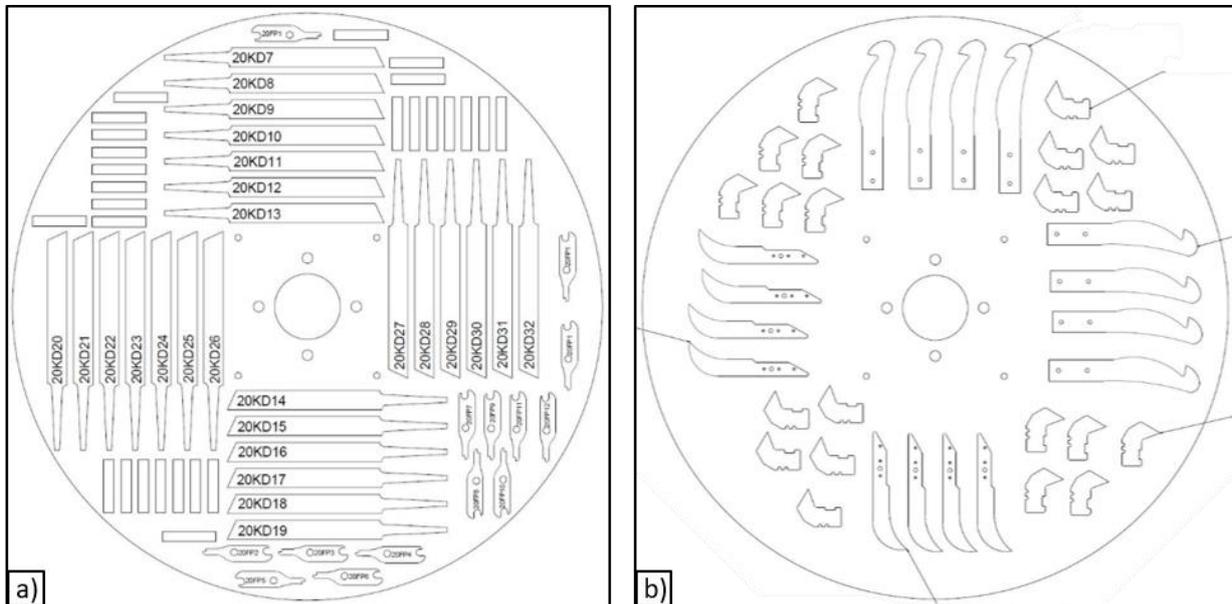


Abbildung 1-22: Zwei Schnittmuster für eine möglichst optimale Anordnung der Repurpose-Rohlinge innerhalb eines verschlissenes Kreismessers.

Im weiteren Verlauf des Konzepts wurden mögliche Fertigungsverfahren recherchiert, die es ermöglichen aus einem flachen, kreisrunden Material mit einer Blechstärke von $t_{max} = 5$ mm die verschiedenen Konturen der Handwerkzeuge wirtschaftlich und ressourceneffizient her auszutrennen. Für das Konzept wurden die in der DIN 8590:2003-09 aufgeführten trennen Fertigungsverfahren, Wasserstrahl- und Laserstrahlschneiden, ausgesucht und angewendet. Grund für die Auswahl lieferte

die blechartige Geometrie des Maschinenkreismessers sowie die effiziente und schnelle Prozessführung der Verfahren. Neben der Auswirkung der Gefügezeitigkeit soll der Einfluss der trennenden Fertigungsverfahren (Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden) auf das Gefüge der Randzone, die Weiterverarbeitung und die Verschleißbeständigkeit analysiert werden.

Nach dem Austrennen der Rohlinge aus den Maschinenkreismessern sieht das Konzept einen Schleifprozess vor. Dieser entspricht den vorhandenen Fertigungsschritten zur Fertigstellung der originalen Handwerkzeugen der Fa. Kirschen und Fa. Freund und wurden durch diese durchgeführt. Diese sollen im Anschluss in definierten Versuchen eingesetzt und charakterisiert werden, um Aussagen über das Verschleißverhalten zu treffen. Eine schematische Darstellung des gesamten Konzepts ist in Abbildung 1-23 dargestellt.

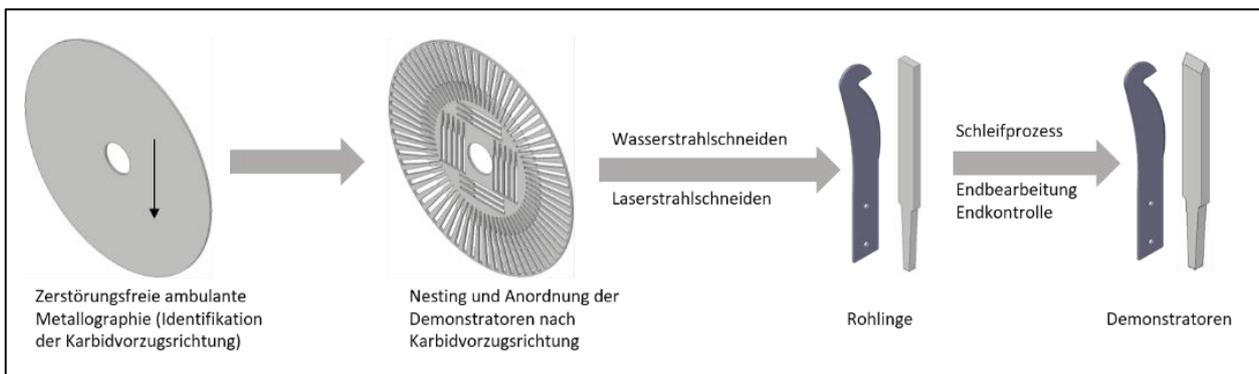


Abbildung 1-23: Schematische Darstellung des Konzepts für den Repurposeprozess. Aus verschlissenen bzw. unbrauchbaren 611er Kreismessern werden über trennende Fertigungsverfahren Rohlinge für neue Handwerkzeuge hergestellt. Anschließend werden diese geschliffen und finalisiert.

AS3.2: Fertigung Demonstrator

Mit dem bestehenden Konzept konnten erste Rohlinge durch Wasser- und Laserschneiden gefertigt und durch die Projektpartner Fa. Kirschen und Freund Demonstratoren hergestellt werden. Die geometrische Anordnung der Rohling auf der Rondenkontur wurden bei den Versuchen nicht optimal berechnet. An einer effizienten Methodik zur Anordnung der Geometrien wird derweilen im Rahmen von Abschlussarbeiten weiter geforscht.

Da *TKM* das Ausschneiden der Rohlinge für die Demonstratoren an externe Unternehmen vergibt, war hier mit einer zeitlichen Unsicherheit zu rechnen. Um eine weitere zeitliche Verzögerung, wie beschrieben, zu vermeiden, wurden frühzeitig Anfragen an mögliche Unternehmen gestellt. Daher konnten verfrüht Unternehmen wie die Fa. Mensler und Fa. HBR beauftragt werden, um die ausgewählten Produkte probeweise auszuschneiden. Hierfür konnten für pilotierende Untersuchungen erste Kreismesser des ursprünglichen Durchmessers $D = 610$ mm mit einem Enddurchmesser von $D_e = 500$ mm durch *TKM* von seinen Endkunden zurückgeholt werden. Ebenso hat die Fa. *TKM* für weiter Versuche Maschinenkreismesser aus der laufenden Produktion zur Verfügung gestellt. Um die zuvor erwähnte Gefügezeitigkeit der von *TKM* zur Verfügung gestellten Maschinenkreismesser bestimmen zu können, wurde eine ambulante Metallographie durchgeführt. Hierzu sind einzelne Bereiche der Ronden händisch geschliffen, poliert und anschließend geätzt worden. Mittels einer

Celluloseacetatfolie, die auf den polierten und geätzten Bereich gelegt worden ist, wurde ein Abdruck des Gefüges genommen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1-24 zu sehen.

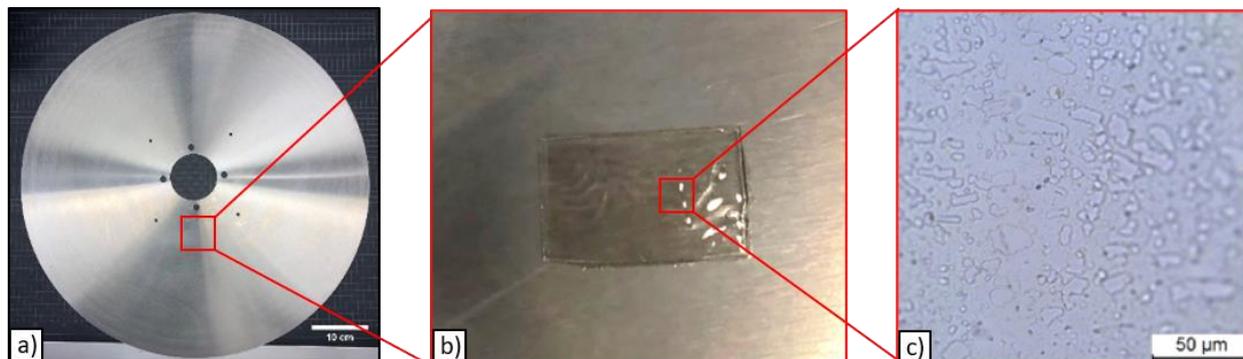


Abbildung 1-24: Erstellen eines Abdrucks mit einer Celluloseacetatfolie zur Bestimmung der Gefügezeitigkeit. a) präparierter Bereich auf dem Kreismesser, b) aufbringen der Celluloseacetatfolie und c) lichtmikroskopische Aufnahme der Celluloseacetatfolie. (Eigene Darstellung)

Die mittels Celluloseacetatfolie genommenen Abdrücke wurden anschließend definiert auf einen Probenträger geklebt und unter einem Lichtmikroskop analysiert. Anhand der gestreckten Karbide lässt sich die Gefügezeitigkeit und somit die Hauptwalzrichtung der Maschinenkreismesser identifizieren. In Abbildung 1-25 ist eine klassische lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Kreismesser Abbildung 1-25 a) neben einer lichtmikroskopischen Aufnahme der Celluloseacetatfolie Abbildung 1-25 b) dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die gestreckten Karbide, die von links unten nach rechts oben verlaufen. Nach dem Identifizieren der Hauptwalzrichtung wurde diese auf den Maschinenkreismessern für das Wasserstrahl- und Laserstrahlschneiden mittels eines Graviergerätes aufgebracht.

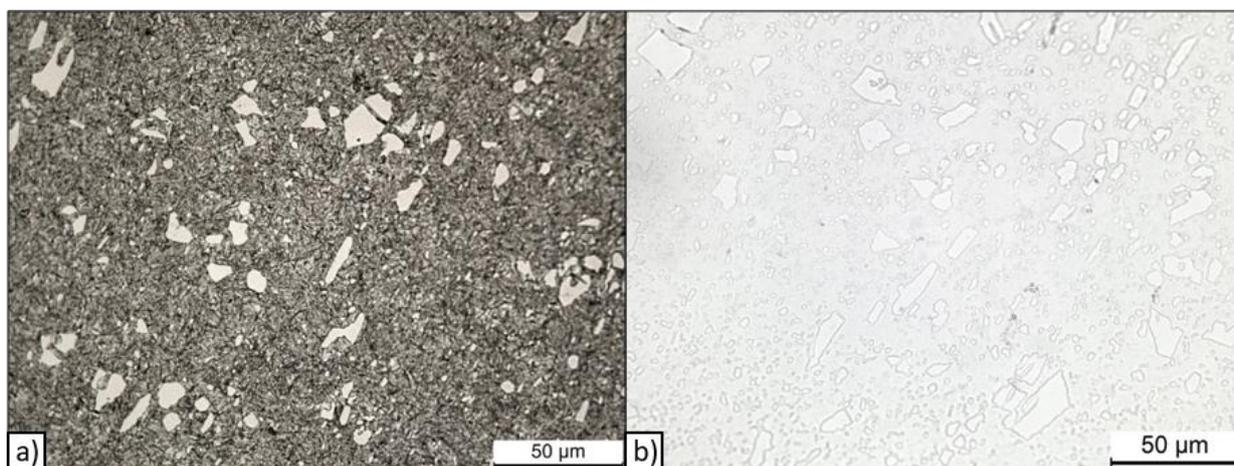


Abbildung 1-25: Lichtmikroskopische Gefügeaufnahmen des Maschinenkreismessers. a) Gefügeaufnahme durch klassischen metallographischen Schliff und b) Aufnahme der des Abdrucks der Celluloseacetatfolie.

Nachdem die Kreismesser auf ihre Karbidzeitigkeit untersucht wurden, wurden vergleichbare Schnittmuster wie in Abbildung 1-22 für die trennenden Fertigungsverfahren Wasser- und Laserstrahlschneiden erstellt. In Abbildung 1-26 ist ein Maschinenkreismesser auf einer Wasserstrahlanlage zu sehen. Auf dem Kreismesser markiert ist die Hauptwalzrichtung, rechts neben der Zentralbohrung.

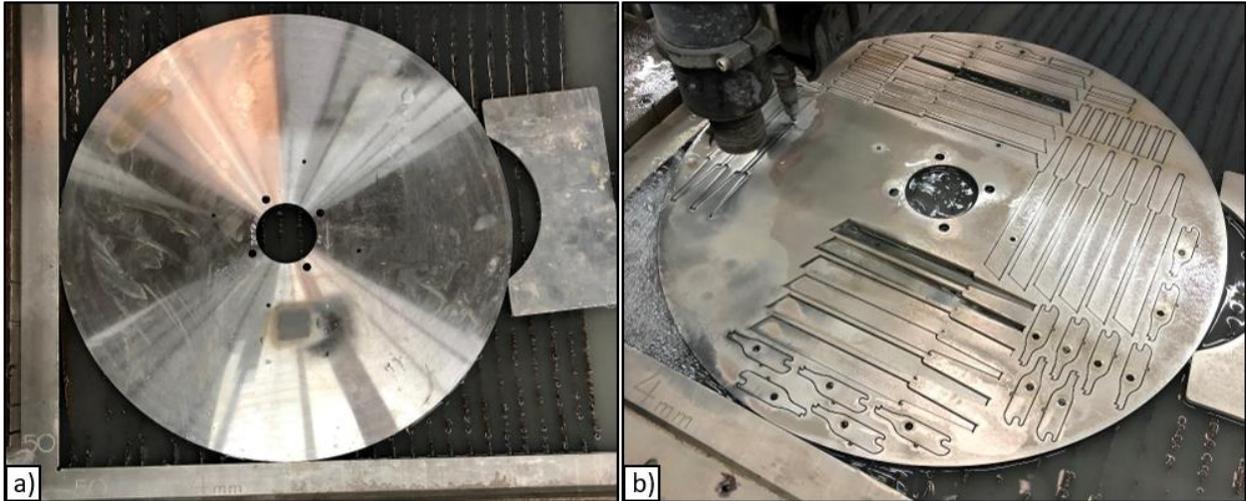


Abbildung 1-26: Abbildung eines Maschinenkreismesser in einer Wasserstrahlanlage. a) Anordnung im Maschinenbett mit Markierung der Karbidvorzugsrichtung rechts neben der Zentralbohrung, b) Schneidprozess beim Wasserstrahlschneiden mit Rohlingen.

Das vorgestellte Ausschnittmuster aus Abbildung 1-22 a) ist deutlich in Abbildung 1-26 b) zu erkennen. Eindeutig zu sehen sind ebenfalls die längs und quer zur Hauptwalzrichtung angeordneten Rohlinge. Neben den Schnittversuchen mittels Wasserstrahlschneiden wurden auch Rohlinge mit dem trennenden Fertigungsverfahren Laserstrahlschneiden ausgeschnitten. In Abbildung 1-27 ist ein verschlissenes Kreismesser in einer Laserstrahlanlage zu sehen. Bei der Herstellung der Rohlinge und dem Schleifen der Demonstratoren sind einige Herausforderungen aufgetreten. Beim Fertigungsprozess des Wasserstrahlschneidens kam es während des Trennverfahrens bei einigen Versuchen zum Bruch der Maschinenkreismesser und einiger Rohlinge (Abbildung 1-28 a -c). Es wird vermutet, dass ein solches Versagen durch die bereits im Material herrschenden Eigenspannungen mit der zusätzlich durch den Wasserstrahl induzierten Druckspannung verursacht wird.

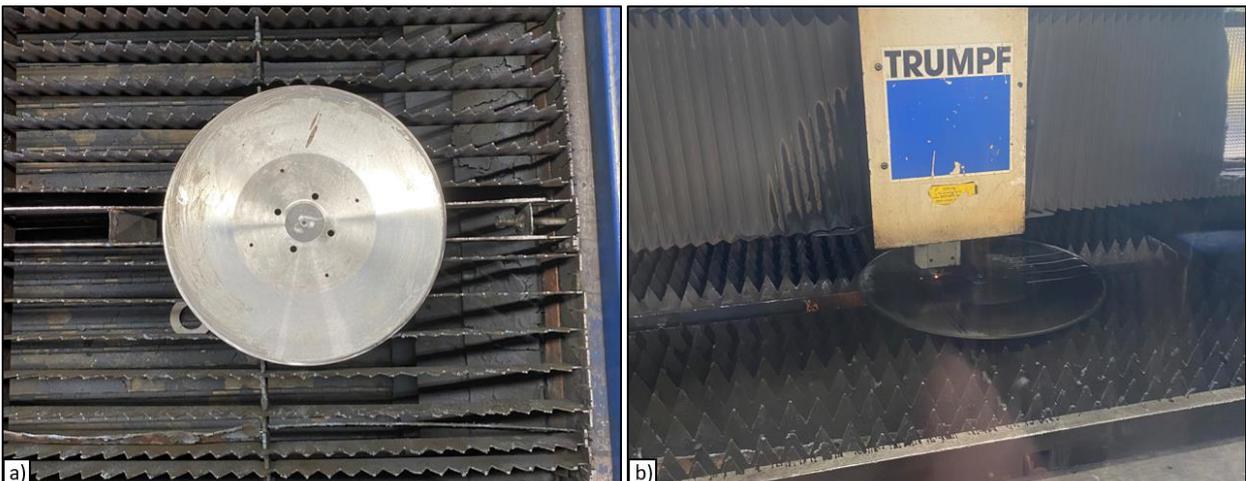


Abbildung 1-27: Abbildung eines verschlissenen Maschinekreismesser in einer Laserstrahlanlage.

Teilweise sind auch beim Schleifprozess einige Rohlinge zerbrochen (Abbildung 1-28 c). Eigenspannungen werden bewusst im Fertigungsprozess der Maschinenkreismesser ins Material eingebracht. Durch das Einbringen der Eigenspannungen über einen Walzprozess wird ein ruhiger und zentrierter Lauf der Kreismesser während der Nutzung gewährleistet. Diese Eigenspannungen lassen

keinen stabilen und sicheren Trennprozess mittels Wasserstrahlschneiden zu. Die schlagartige mechanische Belastung durch den Wasserstrahl und die darin enthaltenen Abrasivpartikel (Druck ca. 6000 bar bei einem Strahldurchmesser von \varnothing 0,1—0,5 mm) führen zu hohen Druckbelastungen und damit zum „Springen“ bzw. „Reißen“ einiger Kreismesser und Rohlinge. Forschungsarbeiten im Bereich der Eigenspannungen werden in Kooperation mit der Ruhr Universität Bochum weiterhin durchgeführt. Hinzukommt der korrosive Angriff des Schneidmediums Wasser, welche die Rohlinge nach erfolgreicher Prozessierung schnell korrodieren lassen. Der Werkstoff X155CrMoV12 (1.2379) des Kreismessers ist durch den hohen Lösungszustand der Legierungselemente nicht korrosionsbeständig genug (Abbildung 1-28 c). Dies führt zu einer erhöhten Nachbearbeitung.



Abbildung 1-28: Abbildung der durch das Wasserstrahlschneiden gebrochenen Kreismesser und Rohlingen.
 a) gerissenes und gebrochenes Kreismesser, b) gebrochene Rohlinge des Pappreißmessers mit Hakenklinge und c) korrodierte und während des Schleifprozesses gebrochenen Pappreißmesser mit Hakenklinge.

Im Vergleich zum Wasserstrahlschneiden konnte bei der Herstellung von Rohlingen mittels Laserstrahlschneiden keine signifikanten Problematiken in der Prozessführung und dem Ertrag der Rohlinge festgestellt werden. Grund dafür ist, dass im Prozess des Laserstrahlschneidens keine mechanischen Kräfte beim Trennprozess aufgebracht werden. Der Trennprozess beim Laserstrahlschneiden wird durch Einbringen hoher Energie in Form von Wärme gewährleistet. Der Laserstrahl schmilzt Material auf. Allerdings kommt es durch den hohen Wärmeintrag zu einer Gefügeveränderung innerhalb der Randzone der Rohlinge. Dieser erneute Wärmeintrag gleicht einer weiteren Wärmebehandlung und verändert das Gefüge innerhalb der Schnittkanten. Diese sogenannte Wärmeeinflusszone ist in Abbildung 1-29 dargestellt. Die Veränderung des Gefüges innerhalb der Randzone verändert die tribologischen und mechanischen Eigenschaften des Gefüges. Das Gefüge innerhalb der Wärmeeinflusszone erweicht und könnte somit nicht den Anforderungen für eine höhere Schnitt- und Schneidhaltigkeit der Repurpose-Demonstratoren gerecht werden.



Abbildung 1-29: Darstellung der Wärmeeinflusszone die durch das Laserstrahlschneiden im Randbereich der Repurpose-Rohlinge induziert wird.

Bei der weiteren Verarbeitung der Rohlinge zu Demonstratoren durch die Fa. Kirschen und Fa. Freund konnte festgestellt werden, dass durch den nachfolgenden Schleifprozess zur Fertigung der jeweiligen Schneiden, die erweichte Wärmeeinflusszone von ca. 200 µm tiefe abgetragen wird und somit keinen negativen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit im Bereich der Schneiden hat. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich für den Repurposeprozess das Verfahren des Laserstrahlschneides besser eignet als das Wasserstrahlschneiden. Es kann eine stabilere Prozessführung und geringster Ausschuss bei der Weiterverarbeitung der Demonstratoren beobachtet werden.

Die Fertigungsversuche von Rohlingen und Demonstratoren haben gezeigt, dass ein Repurposeprozess mit den ausgewählten trennenden Fertigungsverfahren generell möglich ist. Allerdings haben die Forschungsergebnisse gezeigt, dass ein sicherer und qualitativ stabilerer Trennprozess mit dem Trennverfahren des Laserstrahlschneides durchführbar ist. Im Bereich der Schleifprozesse und Finalisierung der Demonstratoren bei Fa. Kirschen und Fa. Freund ist aufgefallen, dass die bisher angesetzten Schleifzeiten nicht eingehalten werden können. Die Bearbeitung des Werkstoffs X15CrMoV12 (1.2379) ist deutlich zeitintensiver. So belaufen sich die Schleifzeit für einen Stechbeitel aus den Originalwerkstoffen zu 55 sec und für einen Demonstrator aus 1.2379 auf 180 sec. Eine Variation der Schleifmittel an den neuen Werkstoff soll Erkenntnisse liefern, ob der Schleifprozess durch angepasste Schleifmittel verkürzt werden kann. Durch Anpassungen der Schleifmedien konnte allerdings keine signifikante Verkürzung der Schleifzeiten beobachtet werden. In Abbildung 1-30 sind die erfolgreich hergestellten Demonstratoren unterschiedlichsten Typen dargestellt.



Abbildung 1-30: Abbildung von ausgeschnitten Demonstrator-Werkzeugen durch den Repurpose-Prozess. a) unterschiedlichste gefertigte und geschliffene Demonstratoren der Firmen Kirschen und Freund, b) fertig montierter Repurpose-Drehselbeitel (oben) und Pappreißmesser mit Hakenklinge (unten).

Teil der Entwicklung waren die Untersuchungen der optimalen Ausnutzung, geeigneter trennender Fertigungsverfahren und des Schleifens. Die Erkenntnisse der oben genannten Forschungen sind im Folgenden zusammengefasst.

Optimale Ausnutzung durch Anordnung

Die im Kreuzwalzprozess eingestellte Vorzugsrichtung der Karbide haben einen Einfluss auf die Qualität und Standzeit der Demonstratoren. Durch die eigens angewandte ambulante Metallographie konnte zerstörungsfrei eine Gefügeanalyse der Kreismesser durchgeführt werden. Mit dessen Ergebnissen konnte die optimale Anordnung der Demonstratoren unter Berücksichtigung der Vorzugsrichtung innerhalb der Kreismesser positioniert werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass je nach Verschleißzustand der Kreismesser mit $\varnothing 611$ mm eine optimale Ausnutzung der Demonstratoren im Verhältnis von 16 Pappreißmessern und 4 Drehselbeiteln oder 22 Pappreißmessern und 4 Drehselbeiteln stehen. Der Verschleißzustand definiert sich über den verbleibenden Restdurchmesser. Ist das $\varnothing 611$ er Kreismesser stärker verschlissen oder genutzt worden, so ist der verbleibende Durchmesser kleiner und weniger Demonstratoren können entnommen werden (16/4). Ist der

Verschleiß gering, so ist der Durchmesser größer und es können mehr Demonstratoren entnommen werden (22/4).

Trennende Fertigungsverfahren

Des Weiteren haben die praktischen Versuche gezeigt, dass Wasserstrahlschneiden kein effizientes und effektives Fertigungsverfahren darstellen. Im Rahmen von Fertigungen der Demonstratoren kam es zu Materialversagen. Das Versagen ist auf die bereits im Material herrschenden Eigenspannungen und die zusätzlichen durch den Wasserstrahl induzierten Druckspannungen zurückzuführen. Die durchgeführten Untersuchungen und Parameterstudien im Bereich der trennenden Fertigungsverfahren haben gezeigt, dass in der DIN 8590:2003-09 aufgeführte trennende Fertigungsverfahren Laserstrahlschneiden für den im Projekt verfolgten Ansatz des Repurposing effektiver ist. So sind durch Laserstrahlschneiden keine Ronden und Rohlinge zerbrochen. Außerdem wurden durch das Laserstrahlschneiden sauberere Schnittkanten und Oberflächen generiert. Ebenfalls entfällt ein korrosiver Angriff der Demonstratoren durch das im Wasserstrahlschneiden verwendete Abrasivmedium „Wasser“. Aus diesem Grund wird im Konzept des Repurposing das Fertigungsverfahren Laserstrahlschneiden verwendet.

Schleifen

Bei der Untersuchung der Schleifprozesse und der Endbearbeitung der Demonstratoren bei Fa. Kirschen und Freund zeigten sich ebenfalls Veränderungen. So konnte festgestellt werden, dass die Schleifzeiten sich für beide Demonstratorarten deutlich erhöhen (Drehselbeitel: von 55 s auf 180 s; Pappreißmesser: von 1.7 min auf 10 min). Eine Anpassung und Abänderung der Schleifmittel konnte leider keine signifikante Verkürzung der Schleifprozesse für die Demonstratoren aus X155CrMoV12-1 (1.2379) hervorrufen. Teilweise sind auch beim Schleifprozess einige Rohlinge zerbrochen. Hier bedarf es die Entwicklung eines praktikablen Prozesses.

1.3.2 Bewertung der Demonstratoren

Zur werkstoffkundlichen Bewertung der Demonstratoren wurden Verschleißtest an originalen Werkzeugen und an den im Projekt hergestellten Demonstratoren durchgeführt. Die Verschleißtest für Drehselbeitel und Pappreißmesser haben Aufschluss über die Standzeit der Produkte in Abhängigkeit der Karbidausrichtung geliefert. Für die Durchführung der Analyse bedurfte es die Entwicklung eigens für diese Untersuchungen konzipierten Testverfahren. Ziel war die Analyse des Verschleißverhaltens der Werkstoffe unter möglichst realer Anwendung. Mittels Bildanalytik sollte ein Vergleich vom Ausgangszustand zum Verschleißzustand ermöglicht werden.

Für den Verschleißtest der Drehselbeitel der Fa. Kirschen wurde ein Rundmaterial aus Weißbuche mit den Abmaßen $\varnothing 80 \times 1000$ mm in eine konventionelle Drehmaschine vom Typ UD500 der Firma Schaerer bei Raumtemperatur eingespannt. Als Werkzeug wurden jeweils die Drehselbeitel aus den Materialien 80CrV2, HSS6-5-2C und X155CrMoV12-1 verwendet. Die Werkzeugspitzen wurden auf die Höhe der Achse des zu zerspannenden Weißbuchholzes ausgerichtet und per automatischen Vorschub linear um 30 mm Einstichtiefe in das Werkstück eingefahren. Nach jedem Einschnitt wurde das Werkzeug händisch zurückgefahren und um dessen Breite nach links versetzt. Als Schnittparameter wurde eine Drehzahl von 900 U/min und ein Vorschub von 0,51 mm/U verwendet. Mit allen Werkzeugen wurden jeweils 100 Einschnitte vorgenommen. Der Versuchsaufbau für den Verschleißversuch ist in Abbildung 1-31 dargestellt.

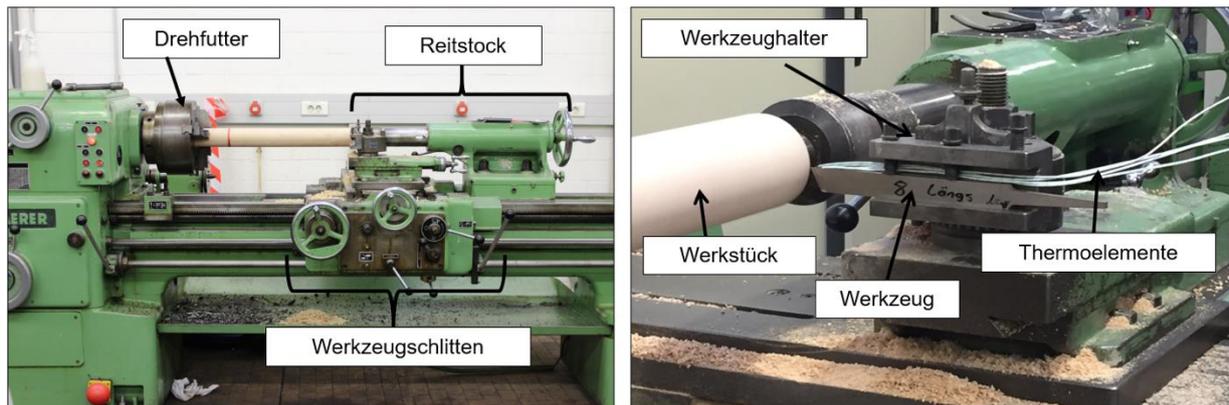


Abbildung 1-31: Versuchsaufbau des Verschleißversuches der Drechselbeitel.

Links: Gesamtaufnahme der Versuchsvorrichtung,
Rechts: Detailaufnahme des Werkzeughalters

Während des Verschleißtests erfolgte eine Temperaturlaufzeichnung der Werkzeuge mit vier Thermoelementen. Diese wurden auf der Spitze der Werkzeuge mithilfe eines Punktschweißgerätes vom Typ Spot Welding Fixture 9061 aufgebracht. Zum Fixieren der Drähte auf den Werkzeugen wurden Stromstärken im Bereich von 5-6 A und einer Schweißzeit zwischen 4-5 s gewählt. Die Thermoelemente wurden an einen Temperaturlogger der Fa. VOLTcraft vom Typ K204 angeschlossen. Nachdem die Versuche an allen Drechselbeiteln durchgeführt wurden, wurden die Drechselbeitel hinsichtlich des Verschleißes bildanalytisch ausgewertet und die ermittelten Temperaturen analysiert. Die Temperaturmessungen haben gezeigt, dass maximale Einsatztemperaturen von bis zu 300 °C erreicht wurden. Auch die genauere Betrachtung der Drechselspitzen hat gezeigt, dass Anlassfarben entstanden sind (Abbildung 1-32). Diese lassen sogar auf Einsatztemperaturen von bis zu 500 °C deuten, welche oberhalb der Anlasstemperaturen für den konventionellen Drechselbeitel aus 80CrV2 liegen (Anlasstemperatur 200 °C).

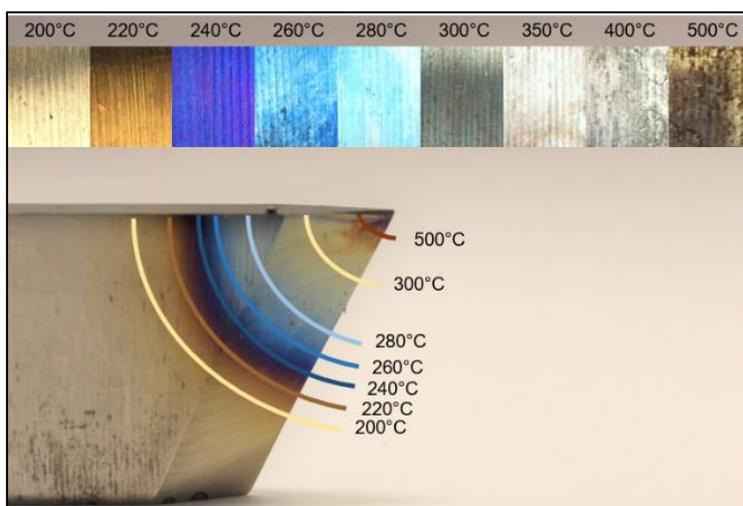


Abbildung 1-32: Anlassfarben der im Verschleißversuch verwendeten Drechselspitzen.

Für den technischen Einsatz sollte die Einsatztemperatur nicht über der in der Wärmebehandlung genutzte Anlasstemperatur liegen. Ein erneuter Temperatureinfluss im Verwendungsfall, welcher höher ist als die eigentliche Anlasstemperatur während der Wärmebehandlung, wirkt als weiterer Anlassprozess. Dies hat eine Erweichung des Gefüges zur Folge und damit eine Härteabnahme, was

den Verschleißwiderstand reduziert. Somit ist der konventionellen Drechselbeitel aus HS6-5-2 (Anlasstemperatur 600 °C) und der alternative gewonnenen Drechselbeitel aus dem Repurpose-Material X155CrMoV12 (Anlasstemperatur 530 °C) für die herrschenden Einsatztemperaturen besser geeignet. Des Weiteren wurden vor und nach den Versuchen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Drechselspitzen aufgenommen. Die Aufnahmen ermöglichen die Ermittlung der prozentualen Verluste der vorher fest definierten Spitzenfläche (Abbildung 1-33). Der Vergleich der Flächen wurde sowohl für die Aufsicht als auch für die Seitensicht durchgeführt. Anhand der Auswertung wird ersichtlich, dass der Repurpose-Drechselbeitel aus dem Werkstoff X155CrMoV12 den geringsten prozentualen Flächenverlust hat (Tabelle 1-12). Damit ist dieser verschleißbeständiger im Anwendungsversuch und gewährleistet wiederum eine verlängerte Nutzungsdauer als die Drechselbeitel aus den konventionellen Werkstoffen.

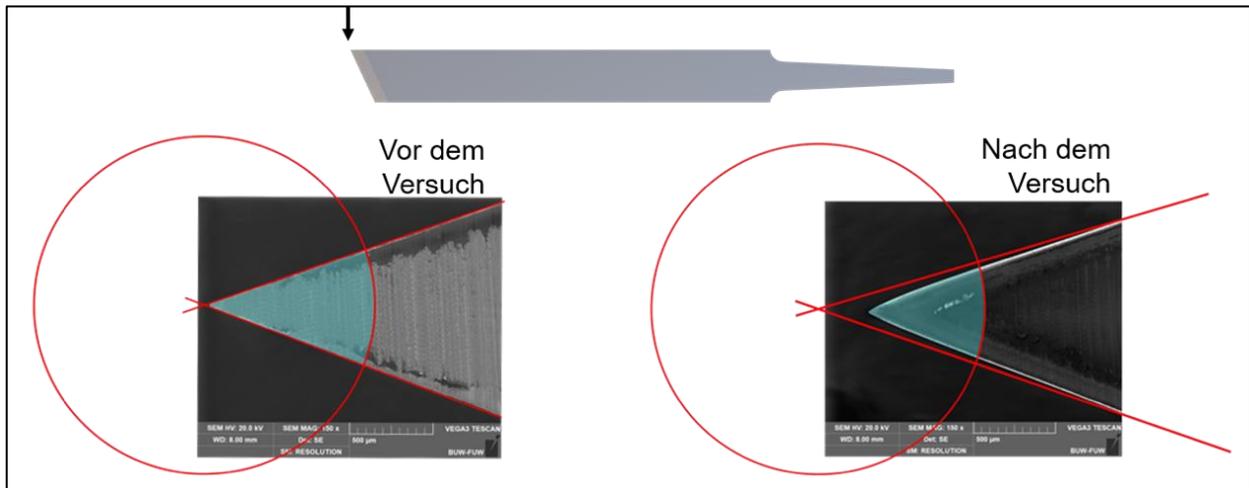


Abbildung 1-33: Darstellung der 2D-Flächenauswertung. Links: Abbildung der Drechselspitze mit definierter Grundfläche, Rechts: Abbildung der verschlissenen Drechselspitze.

Bei der Auswertung ist zu erkennen, dass beim Drechselbeitel aus 80CrV2 die größte prozentuale Differenz entstanden ist. Am besten schneidet der Drechselbeitel aus X155CrMoV12 ab. Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied beim Verschleißwiderstand mit Bezug auf die Karbidausrichtung der aus dem X155CrMoV12 erzeugten Repurpose-Demonstratoren.

Tabelle 1-12: Ergebnisse der 2D-Flächenauswertung der Drechselspitze.

Werkstoff		Prozentuale Differenz	
		Draufsicht	Seitensicht
80CrV2		10,98 %	9,77 %
HSS6-5-2C		5,16 %	5,65 %
X155CrMoV12	Karbide quer zur Schneide	2,61 %	1,72 %
	Karbide längs zur Schneide	2,03 %	3,04 %

Für die Verschleißversuche der Pappreißmesser aus 75Cr1 und X155CrMoV12 wurde eine Vorrichtung in eine Universalprüfmaschine der Fa. Zwick vom Typ Z050 eingebaut. Diese Vorrichtung ermöglichte eine variable Aufnahme des zu prüfenden Schneidwerkzeugs (Pappreißmesser mit Hakenklinge) und eines gewählten Schnittguts, in Form einer handelsüblichen Bitumen-Dachpappe. Die Dachpappe wurde beidseitig in die Vorrichtung eingespannt (Abbildung 1-34).

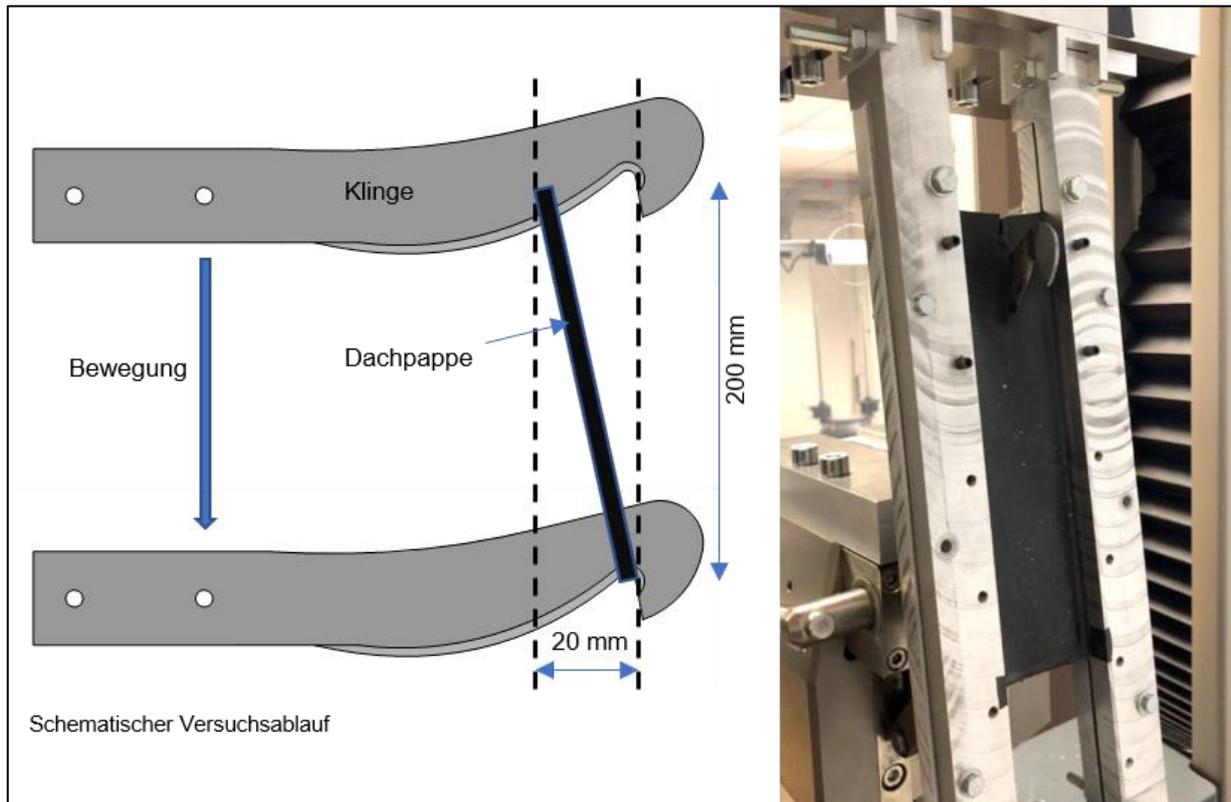


Abbildung 1-34: Darstellung des Schneidversuchs für Pappreißmesser. Links: Schematische Darstellung der Schneidbewegung und Anordnung des Schneidzeugs und Schnittguts. Rechts: Eingebaute Versuchsvorrichtung in der Universalprüfmaschine.

Die Bitumen-Pappe wurde in Versuchstücke mit den Abmaßen 70x210 mm geschnitten. Die Probenstücke wurden mit einem 10 mm langem Schlitz präpariert, in dem das Pappreißmesser eingesetzt wurde. Die Aufspannung für die Pappreißmesser besaß einen Winkel von 0° . Es wurde waagrecht eingespannt. Die Schnittgeschwindigkeit betrug 3 mm/s. Die Schnittlänge durch die Probe wurde auf 200 mm eingestellt, wobei ein Schnittbereich der Klinge von 20 mm angefallen ist. Die Bitumenprobe wurde in einem 6° -Winkel ausgerichtet. Durch diese Anordnung konnte eine Kombination aus einer Zug-Druck-Schnittbewegung nachgestellt werden. Jedes Pappreißmesser wurde 50-mal durch eine neue Bitumenprobe gezogen. Während der Prüfung wurden Kraft-Weg-Diagramme aufgenommen. Diese konnten dann nach einem Zyklus (Scharfes Pappreißmesser) mit denen nach 50 Zyklen (stumpfes Pappreißmesser) verglichen werden. Ebenso wurde das Gewicht der Klingen vor und nach dem Versuch aufgenommen und die Kantenverrundung der Klingenschneiden begutachtet (Abbildung 1-36). Die Auswertung der Kraft-Weg-Diagramme (Abbildung 1-35) hat ergeben, dass ein konventionelles Pappreißmesser aus dem Werkstoff 75Cr1 einen mittleren Kraftaufwand von 159 N benötigt, um die Bitumenprobe zu durchtrennen. Nach 50 Zyklen, also im verschlissenen Zustand, muss eine Schnittkraft von 200 N aufgewendet werden. Das lässt darauf schließen, dass durch den Verschleiß

ein Materialabtrag der Schneide einsetzt. Diese wird stumpf und es wird mehr Kraft zum Durchtrennen der Bitumenprobe benötigt. In Abbildung 1-36 ist der deutlichere Materialverlust und die damit stärker auftretende Kantenverrundung der Schneide des Werkstoffs 75Cr1 im Vergleich zur Schneide des X155CrMoV12 zu erkennen. Auch die Gewichtsmessung vor und nach dem Versuch spiegeln dieses Ergebnis wider. So verliert das Pappreißmesser aus dem Werkstoff 75Cr1 0,04 g an Material, während die Klingen aus dem Werkstoff X155CrMoV12 nur 0,01 g verlieren. Auch bei der Versuchsdurchführung der Pappreißmesser wurde die Anordnung der Karbide innerhalb der Schneide berücksichtigt. So betrug die Anfangsschnittkraft einer scharfen Klinge aus X155CrMoV12 mit der Karbidausrichtung längs zur Schneide im Mittel 178 N und nach 50 Zyklen 191 N. Bei der Variante mit Ausrichtung der Karbide quer zur Schneide wurden im Ausgangszustand 183 N Zugkraft im Mittel benötigt, um die Bitumenprobe zu durchtrennen. Nach 50 Zyklen stieg die gemittelte Kraft auf 189 N an. Damit konnte gezeigt werden, dass die Repurpose-Klinge der Pappreißmesser aus X155CrMoV12 weniger verschleißanfällig ist. Die Verrundung der Schneide verläuft aufgrund der besseren Verschleißbeständigkeit langsamer ab, die Schneide bleibt länger scharf.

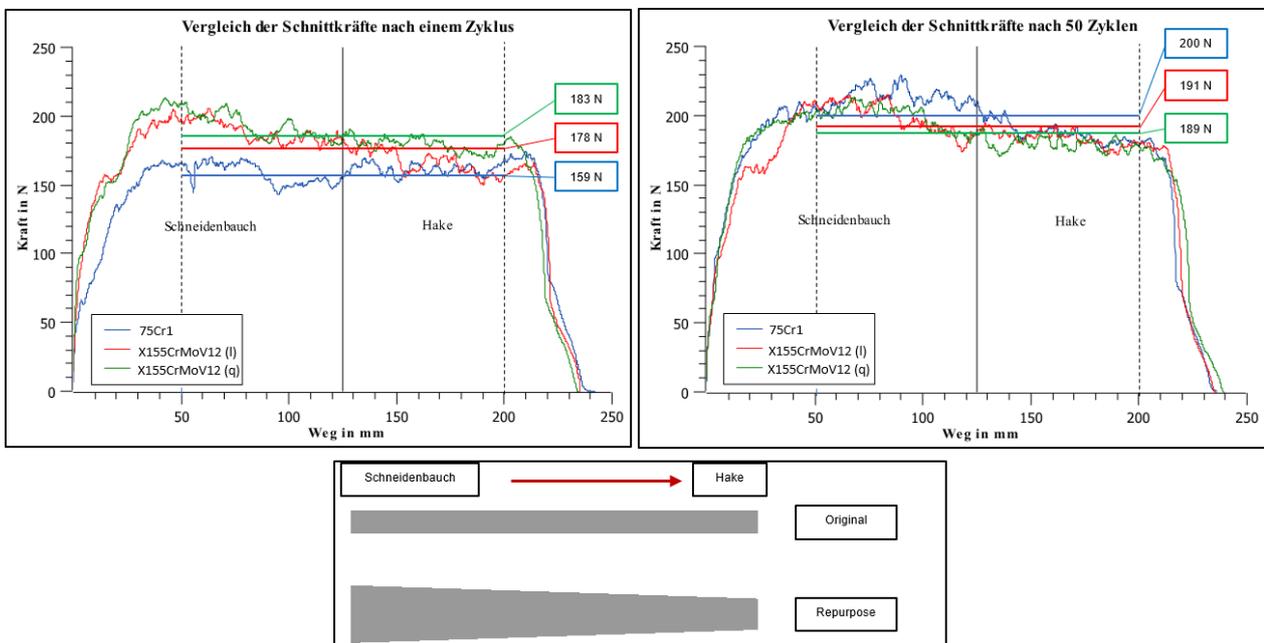


Abbildung 1-35: Darstellung des Kraft-Weg-Diagramme mit Vergleich des Schnittkräfte nach einem Zyklus (links) und nach 50 Zyklen (rechts).

Die Kantenverrundung fällt deutlich geringer aus als die bei der Schneide der Pappreißmesser aus 75Cr1, was deutlich in Abbildung 1-36 zu erkennen ist. Dies wird durch die Größenverhältnisse der blauen Pfeile dargestellt. Durch beide Verschleißtests konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Repurpose-Materialien eine Alternative zu den bisher etablierten Materialien sein kann. In dem bestimmten Anwendungsfall können die wiederverwendeten Werkstoffe sogar ein Material-Upgrade darstellen. So weisen die gefertigten Demonstratoren hinsichtlich der anwendungsnahen Verschleißtests eine bessere Standzeit auf als die konventionellen Pappreißmesser.

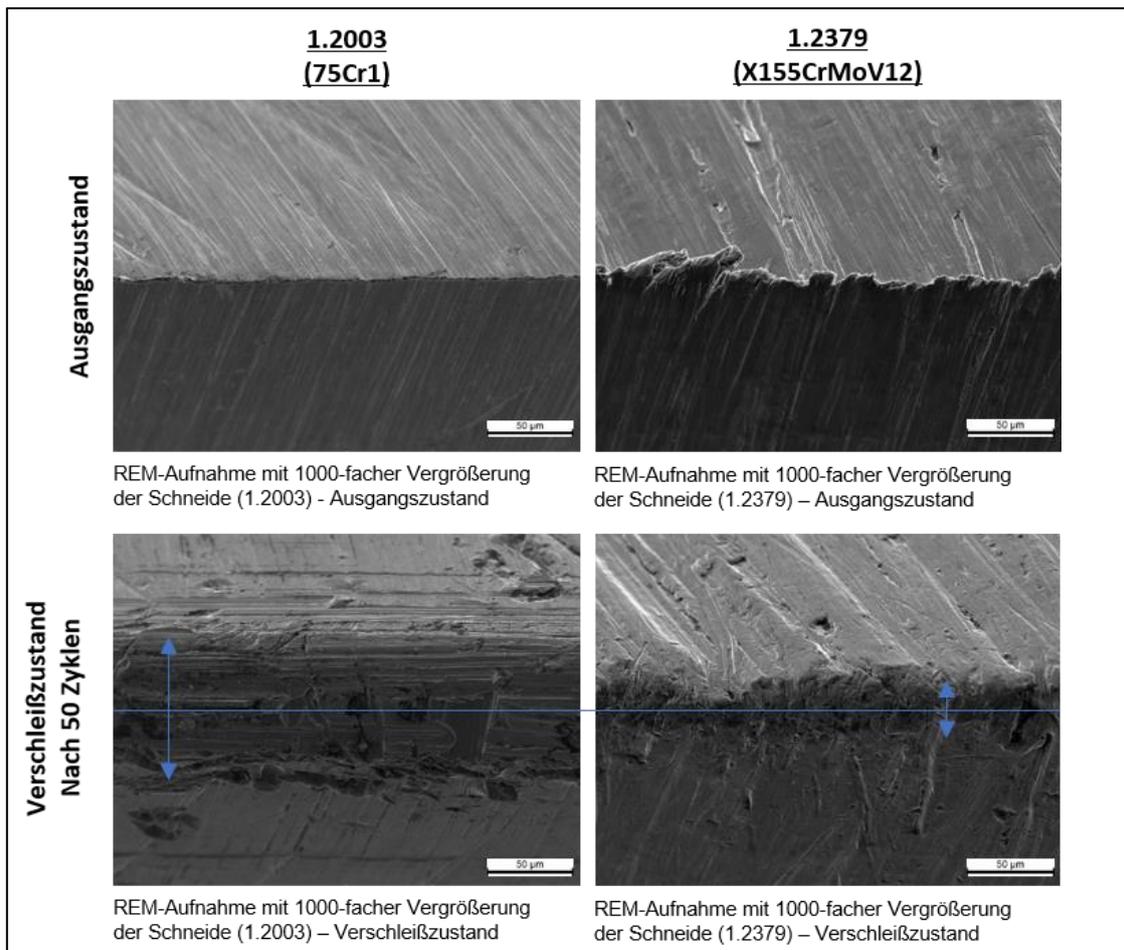


Abbildung 1-36: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Schneiden. Zu erkennen sind die scharf geschliffenen Schneiden im Ausgangszustand (oben) und die deutlich eintretende verschleißbedingte Kantenverrundung (unten).

1.3.3 Geschäftsmodellentwicklung

Die zuvor beschriebene methodische Vorgehensweise zur Geschäftsmodellentwicklung (Kapitel 1.2.3) findet auch für das SOLL Szenario des Repurposing Anwendung. Das Implementieren des Repurposings führt in mehr BMC Bausteinen zu Veränderungen als das Remanufacturing und ist als Diversifizierung von TKM einzuordnen. Denn TKM wird damit zu einem Lieferanten von Rohmaterial bzw. Halbzeug und nimmt somit eine neue Funktion ein. Somit führt das Implementieren des Repurposings auch in mehreren Bereichen zu Veränderungen als das Geschäftsmodell zum Remanufacturing. Beim Repurposing muss sich TKM zudem entscheiden, wie tief der Eingriff in die Wertschöpfungskette und die Verantwortung sein soll:

- 1) reine Information an z.B. Kirschen und Freund sowie Vermittlung der verschlissenen Ronden als Rohmaterial
- 2) Rückholung des Rohmaterials und Verkauf an Unternehmen für Schneidtechnologien oder Hersteller für Schneidwerkzeuge
- 3) Bereitstellung von Halbzeug, was die Logistik und Beauftragung bzw. Durchführung der Fertigung des Halbzeugs umfasst

Die Wahl der Wertschöpfungstiefe hat Auswirkungen auf die Ausgestaltung des Geschäftsmodells. Konkret betrifft es z.B. die damit verbundenen Aktivitäten, Verantwortlichkeiten sowie Chancen der erhöhten monetären Wertschöpfung und Risiken.

Die Umsetzung des Repurposings fordert eine enge Zusammenarbeit mit Kunden und verarbeitenden Unternehmen. Die Kompatibilität zwischen Materialeigenschaften zwischen Ronde und Zielprodukt ist entscheidend für den Erfolg der Zusammenarbeit. Die bestehenden Partnerschaften aus dem Forschungsprojekt ermöglichen die werkstofflichen Untersuchungen als begleitenden Prozess zum Zusammenbringen geeigneter Koppelprodukte. Die Qualitätskontrolle der verschlissenen Messer ist ein entscheidender Faktor hinsichtlich Arbeitssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Reputation. Das Material und die Materialeigenschaften sind bekannt und bleiben über die Nutzenphase hinaus unverändert. Allerdings haben die Fertigungsversuche gezeigt, dass es zu unbeabsichtigten Rissen der Ronden beim Laserschneiden des Halbzeugs kommen kann. Hier muss TKM eine Qualitätskontrolle etablieren, die etwaige Brüche in der Fertigungsphase verhindert und die Zuverlässigkeit des Materials in der zweiten Nutzenphase sicherstellt.

Durch die Nutzung der verschlissenen Ronden am Lebenszyklusende stellt sich TKM in den Wettbewerb mit Schrotthändlern und Herstellern von Halbzeug. Der Konkurrenzdruck der Schrotthändler gemessen an dem Gewicht der Ronden ist allerdings als gering zu bewerten, da es sich im Vergleich zum jährlichen Schrotteinsatz in der deutschen Stahlherstellung (ca. 20 Mio. T) um eine sehr geringe Masse handelt.

Ein weiteres wesentliches Handlungsfeld ist das Ertragsmodell zur Beeinflussung der Versorgungssicherheit und Rechtmäßigkeit. Die Analyse der Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeit sind zu bewerten, wenn über die Tiefe des Eingriffs in die Wertschöpfungskette sowie die Durchführung bestimmter Prozesse durch intern oder extern entschieden ist.

Handlungsfelder bei der Gestaltung der Geschäftsmodelle

Bei der Analyse der Geschäftsmodellentwicklung für die zirkulären Strategien Remanufacturing und Repurposing sind die gleichen Handlungsfelder identifiziert worden. Dazu gehört auch die ökonomische und ökologische Analyse, welche separat erfolgt (Kapitel 1.4.2). Die Analyse ist entscheidend für die USPs der Produkte – die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit. Die weiteren Handlungsfelder ist das Ertragsmodell, Nachweismöglichkeiten für die gehobene Nachhaltigkeit und die Rechtmäßigkeit. Wobei letzteres grundlegend für die legale Umsetzung der Fertigung ist. Für alle drei Bereiche erfolgte eine Recherche, um die Gestaltungsmöglichkeiten des Unternehmens aufzuarbeiten. Zur Untersuchung der Rechtmäßigkeit wurden Experteninterviews geführt, da es sich um eine fachfremde Fragestellung handelt.

Rechtmäßigkeit

Die methodische Vorgehensweise zur Untersuchung der Rechtmäßigkeit umfasst die Durchführung von Experteninterviews. Zur Erarbeitung des dafür notwendigen Gesprächsleitfadens ist das Einarbeiten in das KrWG, Verordnung des Europäischen Rates zur Handhabung von Schrotten, Einschätzungen des UBA, BDE etc. grundlegend. So erlangen die durchführenden Personen ein grundlegendes Verständnis des Sachverhalts und können Fragestellungen erarbeiten. Auf dessen Basis erfolgte das Erstellen eines Leitfadens für ein halbstrukturiertes Experteninterview. Die drei Experten sind Professoren und Lehrbeauftragte und arbeiten im Kontext der Abfallwirtschaft. Dennoch sind die Forschungs- und Arbeitsschwerpunkte unterschiedlich. So decken die Experten den Bereich Umweltrecht, Wirtschaftsrecht und internationales Wirtschaftsrecht ab.

Die Interviews zeigen, dass der Abfallbegriff theoretisch klar definiert ist. In der Praxis kommt es allerdings zu Verständnisproblemen. Neben dem allgemeinen Abfallbegriff gibt es zudem gesonderte Spezifikationen für einige Abfallfraktionen: Elektronikgeräte, Batterien, Altfahrzeuge, Verpackungen. Wenn ein Produkt Abfall ist bzw. die Abfalleigenschaft erfüllt, gelten die Vorschriften der Verwertung. Das heißt, es sind Maßnahmen der Abfallbehandlung durchzuführen, die zur Aufhebung der Abfalleigenschaft führen. Mit dem Vorgang gehen Verfahrensvorschriften einher, die unter das Bundes-Immissionsschutzgesetz fallen (§13 KrWG). Bei der Anwendung des CE Konzepts Repurposing kommt es potenziell zu Konflikten mit dem KrWG. Handelt es sich bei dem verschlissenen Maschinenkreismesser am Produktlebenszyklusende um Abfall, so wird TKM durch den Prozess der "Vorbereitung zur Wiederverwendung" rein rechtlich möglicherweise zu einem Betreiber einer Abfallanlage, was der Genehmigung bedarf. Ob ein Produkt Abfall ist, hängt vom Letztbesitzer ab und (1) dessen Entledigungswillen, (2) der Verkehrsanschauung und (3) der Zweckbestimmung. Das Fallbeispiel fordert in jedem Fall eine juristische Beurteilung und konnte in erster Instanz nicht klar eingeordnet werden.

Aus zivilrechtlicher Perspektive ist die Abfallentsorgung ein Akt der Eigentumsaufgabe. Da im deutschen Vertragsrecht Vertragsfreiheit besteht, ist die Rückgabe der Kreismesser sowie dessen Weiterverarbeitung aus wirtschaftsrechtlicher Perspektive möglich. Hier bilden die AGB die Grenzen und sorgen für einen Interessensausgleich aller Beteiligten. Durch Gestaltung der Vertragsgrundlage kann das Recycling umgangen bzw. vorbehalten werden. Aus Perspektive des Abfallrechts sind zivilrechtliche Vereinbarungen im Sinne von Vertragsgestaltungen nicht geeignet den Abfallbegriff zu umgehen. Der Sachverhalt ist in jedem Fall juristisch zu prüfen und ein Gutachten zu erstellen. Dabei ist sowohl die abfallrechtliche als auch zivilrechtliche Perspektive zu berücksichtigen.

Ertragsmodell

Das Umstellen des Ertragsmodells ist ein Gestaltungsinstrument für TKM. So kann TKM z.B. Eigentümer bleiben, was Vorteile wie die zeitliche und mengenmäßige Steuerung sowie erhöhte Versorgungssicherheit hat. Möglicherweise kann die Umstellung des Ertragsmodells auch eine Lösung sein die Abfalleigenschaft der Produkte zu umgehen. Die Geschäftsführung von TKM hat als Vision auch die Umstellung auf den Verkauf von Schnittleistungen geäußert. Die Umstellung ist mit einem einmaligen Aufwand verbunden. Eine wesentliche Herausforderung kann die Akzeptanz der Kunden darstellen.

Grundsätzlich kann gemäß Tukker (2004) in folgende Ertragsmodelle unterschieden werden:

- (1) **Klassisches Ertragsmodell:** Verkauf des Produktes
- (2) **Produkt-Service-Systeme:** mit
 - a. **Produktorientierung:** Produkt wird verkauft, zusätzlich wird Service Leistung (z.B. Wartung) angeboten. Die Rücknahme des Produkts kann vereinbart werden und Pfandsysteme bieten Anreize zur Rückgabe des Produkts.
 - b. **Nutzungsorientierung:** Produkt bleibt im Eigentum des Verkäufers und Kunde darf Produkt nutzen. Hierunter fällt auch Leasing mit einem Vertrag über bestimmte Nutzungsdauer ohne Kaufoption.
 - c. **Ergebnisorientierung:** Die Leistung wird unabhängig vom Produkt verkauft. Dazu zählt z.B. Pay per Service Unit. Das bedeutet in diesem Fall den Verkauf der Schnittleistung.

Im Rahmen der untersuchten zirkulären Strategien ist die Rückgabe der verschlissenen Maschinenkreismesser am Produktlebenszyklusende grundlegend. Diese Rückgabe kann durch die Gestaltung der Ertragsmodelle initiiert und für die Kund*innen attraktiv gestaltet werden. In der nachstehenden Tabelle sind verschiedenen Möglichkeiten zusammengefasst.

Tabelle 1-13: Übersicht an Ertragsmodellen (Lindkvist & Sundin, 2016)

Ertragsmodell	Beschreibung
Ownership-based	Der Hersteller besitzt das Produkt, aber Kunde nutzt es. Dazu dienen Modelle der Vermietung, Leasing, oder Product-as-a-Service.
Service contract-based	Es besteht ein Service-Vertrag zwischen Hersteller und Kunden.
Direct-order based	Der Kunde gibt das benutzte Produkt dem Hersteller zurück, das Produkt wird aufbereitet und der Kunde erhält ein aufbereitetes Produkt wieder zurück.
Deposit-based	Wenn ein Kunde ein Reman Produkt kauft, ist er verpflichtet, ein gleiches/ ähnliches Produkt dem Hersteller zurückzugeben. Der Kunde ist gleichzeitig ein Zulieferer für den Hersteller.
Credit-based	Wenn der Kunde ein gebrauchtes Produkt wieder zurückgibt, erhält er Ermäßigung auf das nächste gekaufte Produkt.
Buy-back-based	Der Hersteller kauft das genutzte Produkt vom Endnutzer auf und bereitet diese wieder auf.
Voluntary-based	Der Zulieferer gibt die genutzten Produkte an den Hersteller weiter. Der Zulieferer kann der Kunde sein, muss aber nicht.

Bei der Untersuchung der Ertragsmodelle haben sich vor allem 2 Versionen als relevant herausgestellt: (1) Pfandsystem und (2) Verkauf von Schnittleistung.

Im Falle des Pfandsystems schlägt TKM auf den Kaufpreis Pfand auf und verkauft die Ronde an die Kunden (Eigentumswechsel). Durch den monetären Aufschlag entsteht ein Anreiz für den Kunden, die Ronden nach der Nutzung wieder zurück an TKM zu geben, um Pfand zurückzubekommen. Die Pfandgebühr kann auch in den Kaufpreis eingerechnet werden. TKM bietet dann eine Pfandauszahlung bei Rückgabe der Ronden an. Das kann z.B. in Form eines Rabatts auf den Kauf einer neuen Ronde erfolgen, was die Käuferbindung fördert. TKM ist nach der Rückgabe wieder Eigentümer. Das Modell bewegt sich im Spannungsfeld zwischen Rentabilität für TKM und Attraktivität seitens der Kunden. So muss das Pfand höher sein als der Schrottpreis, da die Kunden die Ronden alternativ an Schrotthändler verkaufen. Dabei sind Preisschwankungen und Aufwand der Handhabung seitens der Kunden zu berücksichtigen. Je höher der Pfandbetrag, desto höher gleichzeitig auch der ökonomische Anreiz, dass nicht mehr benötigte Produkt abzugeben. Ein zu hoher Pfandbetrag kann unverhältnismäßig sein, den Eindruck einer Preissteigerung vermitteln und somit die Attraktivität senken. Auf volkswirtschaftlicher Ebene kann die Etablierung auch zur Bindung von Kapital führen, was die finanzielle Leistungsfähigkeit

herabsetzt. Die stetige Anpassung der Pfandhöhe an bspw. den Schrottpreis bedeutet administrativen Aufwand.

Alternativ kann TKM auch auf den Verkauf von Schnittleistung umstellen. TKM verkauft nicht das Kreismesser als Produkt, sondern lediglich die Leistung und bleibt somit Eigentümer. Es wird vertraglich festgelegt, nach welcher Schnittleistung die Ronde zurückgegeben werden muss. Der Preis für die Schnittleistung muss günstiger sein als der Kaufpreis abzgl. Einnahmen durch den Schrottpreis. Zu berücksichtigen ist auch möglicher zusätzlicher Mehrwert durch bspw. ein automatisiertes Bestellsystem. Dabei muss das Optimum zwischen Lagerkosten seitens Kunden und Logistik- sowie Verpackungskosten bei TKM (sprungfixe Kosten) berücksichtigt werden. Eine Problematik beim Verkauf von Schnittleistung ist, dass das Kreismesser als solches erst in Kombination mit der Maschine Leistung erbringt. Über die Maschine werden auch die wesentlichen Parameter gesteuert, die auf die Schnittleistung einwirken wie die Häufigkeit des Schleifens. Auch erfolgt über die Maschine die Messung der Schnittleistung. Grundsätzlich ist es daher sinnvoll und denkbar, dass TKM in Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern ein Geschäftsmodell zum Verkauf von Schnittleistung entwickelt und etabliert.

Bei der Entwicklung des Ertragsmodells von TKM zur Umsetzung des Remanufacturings und Repurposings sind demnach folgende Punkte zu berücksichtigen: Kundenakzeptanz, Haftungsfälle bzw. Garantie, Bestimmung der Qualitätsanforderungen an die Nutzung, Anforderungen an das Abrechnungssystem, Messung der Umdrehungszahlen, Kostenoptimierung durch Chargieren und Wechselwirkung zwischen Schnittleistung sowie Schleifhäufigkeit.

Nachweismöglichkeit

Die Zahlungsbereitschaft für Reman Produkte ist teilweise bis zu 15% niedriger. Studien zeigen, dass die Zertifizierung von Produkten hinsichtlich ökologischer Vorteilhaftigkeit die Zahlungsbereitschaft hingegen erhöhen (Boyer et al., 2021). Vor diesem Hintergrund ist ebenfalls eine Recherche bzgl. Nachweismöglichkeiten erfolgt.

Auf europäischer Ebene gibt es bereits eine Mehrzahl an Richtlinien und Verordnungen, die zum Teil auch in Produktlabels münden – Tab. 3. Alle zielen darauf ab, Produkte mit möglichst geringen ökologischen Auswirkungen zu fördern. Zukünftig wird dieses Ziel politisch immer stärker verfolgt (European Commission, 2020). Keines der bekannten Verordnungen ist für das Anwendungsbeispiel relevant. Die Entwicklung ist jedoch nicht abgeschlossen. So ist für 2022 z.B. die Einführung eines von der Industrie geführten Berichts- und Zertifizierungssystems für industrielle Symbiosen geplant.

Tabelle 1-14: Übersicht an Richtlinien auf EU-Ebene (Pastor et al., 2014)

Europäische Produkt Richtlinien und Verordnungen	Ziel	Verpflichtung	Adressaten der Richtlinien
Ecodesign Directive	Die am wenigsten umweltfreundlichen Produkte vom Markt entfernen	Ja	Market Authorities
Labelling Directive	Den Markt auf umweltfreundlichere Produkte umstellen	Ja	Konsument*innen
EU Green Public Procurement	Steigerung des Marktanteils von Produkten mit guter Umweltverträglichkeit	Nein	Öffentliches Beschaffungswesen
EU Ecolabel	Auszeichnungen für die Umweltfreundlichkeit von Produkten	Nein	Konsumenten und Unternehmen

Das politische Ziel ist die Etablierung eines produktpolitischen Rahmens, der nachhaltige Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zur Norm statt zur Ausnahme macht. Um dieses Ziel zu erreichen, wird seit 2011 an der Entwicklung einer harmonisierten Methodik zur Berechnung des

ökologischen Fußabdrucks von Produkten und Organisationen gearbeitet. Der Product Environmental Footprint (PEF) und der Organisation Environmental Footprint (OEF) werden als geeignete Messmethoden zur Messung der Umweltleistung diskutiert. Es wurden bereits mehrere Pilotphasen für Produktgruppen durchgeführt, und es wurden Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs) und Organisation Environmental Footprint Sector Rules (OEFSRs) erarbeitet - auch für Stahl. Diese können für die Berechnung des Umweltfußabdrucks von Produkten mit Stahl verwendet werden. (EC, 2021)

Derzeit finden neue Konsultationen zu den Sektoren Kleidung und Schuhe statt. Da die Transition Phase (begonnen im Jahr 2018) Ende 2021 ausläuft, wird diskutiert, ob diese Berechnungsmethoden in existierende Regulierungen mit aufgenommen werden, wie in den CEAP oder die SPI (BDI, 2019; Eurovent, 2021), oder ob ein eigenes PEF Umweltlabel entwickelt wird (Finkbeiner et al., 2018). Das Ergebnis ist noch offen. Die Industrie bewertet PEF Methode noch als unzureichend.

Zum jetzigen Stand gibt es noch kein etabliertes Label oder Zertifikat für die Ausweisung der Ressourceneffizienz bei Produkten. Die ISO Norm zum Thema Kreislaufwirtschaft wird derzeit entwickelt. Und es gibt bereits erste Bewertungsansätze, die sich nicht exakt auf den Untersuchungsfall anwenden lassen, aber für die Unternehmen dennoch relevant sein können (Tabelle 1-15:).

Tabelle 1-15: Bewertungsansätze zur Ausweisung von Nachhaltigkeitsaktivitäten

Bewertungsansatz	Beschreibung	Quelle
Circulytics 2.0	Bewertung des Grads der Kreislaufwirtschaft von Unternehmen	(Ellen MacArthur Foundation, 2020)
Material Circularity	Mikro-Ebene, Bewertung der Kreislauffähigkeit von Produkten, unterstützt Entscheidung und Gestaltung	(Ellen MacArthur Foundation, 2015)
Cradle to Cradle Certified	Mikro-Ebene, Bewertung der Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von Produkten	(C2C, 2014)
Circular Transition Indicator Tool	Bewertung von Unternehmen	(WBCSD, 2019)
GRI Indicator Waste 306	Reporting Richtlinien für Nachhaltigkeit geben Indikatoren vor zur Messung von u.a. Abfallströmen	(GRI, 2020)

Die ausgewiesenen Tools sind hinsichtlich Zielsetzung, Anwendung und Aufwand unterschiedlich zu bewerten. Teilweise ist die Erhebung kostenpflichtig.

1.4 Arbeitspaket 4 – Rückholprozess

1.4.1 Konzept für Kennzeichnung und Transport

In diesem Projekt wurde festgestellt, dass eine eindeutige Markierung der Kreismesser unumgänglich ist. Als Kennzeichnung wurde eine DMC-Code festgelegt, der bei teilweiser Beschädigung und auch unter schwierigen Lichtverhältnissen noch automatisch lesbar ist. Der ursprünglich festgelegte Inhalt

des Codes wurde in Abstimmung mit dem Produktionsbereich bei TKM wieder verworfen. Stattdessen wird eine Kombination aus der neunstelligen Fertigungsauftragsnummer bevorzugt, die bei TKM über alle Werke eindeutig ist, sowie eine fortlaufende vierstellige Nummer innerhalb eines Fertigungsauftrags. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es problemlos auf andere Produkte und Werke übertragbar ist. Eine Doppelvergabe ist ausgeschlossen und eine Recherche ist sehr einfach durchführbar. Der darstellbare Nummernbereich mit 18 Zeichen des Datamatrixcodes wird nur zum Teil ausgenutzt und ist damit äußerst langfristig nutzbar.

Der daraus resultierende Datamatrixcode muss nachfolgend mittels geeigneter Verfahren auf die Messer aufgebracht werden. Nach umfangreichen Tests wurde dem Verfahren mit einem Lasersystem gegenüber einem Nadelgravursystem der Vorzug gegeben. Damit die Lasersignatur nach dem Schleifen nicht zu stark beschädigt wird, findet die Signierung in einer zuvor auf dem Kreismesser gefrästen Tasche statt, die ca. 0,2 mm tief ist.

Basierend auf diesem Konzept war es notwendig, mit verschiedenen Anbietern von Lasergeräten noch einmal aufwendige Vergleichstests durchzuführen. Hier galt es auch die Frage zu klären, welche Laserleistungsklasse notwendig ist, um eine ausreichende Prägetiefe innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters zu erreichen und die Lesbarkeit des Codes nach der Wärmebehandlung und der Schleifbearbeitung zu gewährleisten. Gegen Ende des Berichtszeitraums konnte das geeignetste Gerät bestimmt werden. Bedingt durch Lieferengpässe und durch notwendige Umbau- und Anpassungsarbeiten in der ersten Bearbeitungsstation konnte die Produktkennzeichnung erst nach dem Berichtszeitraum Einzug halten.

Für den Rücktransport gebrauchter Kreismesser wurde ein Transportbehälter (Abbildung 1-37) entworfen, der die folgenden Eigenschaften aufweist:



Abbildung 1-37: Transportbehälter für verschlissene Kreismesser

- *Sicheres Einlegen von verschlissenen, aber gefährlich scharfer Kreismesser:*
Mit Hilfe einer Schutzvorrichtung („Knife Guard“) wird das Messer nach Gebrauch aus der Produktionsmaschine entnommen und zum Transportbehälter getragen. Über dem geöffneten Behälter wird die Schutzvorrichtung gelöst, so dass das Messer in den Behälter ohne Gefährdung der Person hineinfallen kann. Dabei wird das Messer mittig durch einer Gewindestange geführt, die mittels einer Platte mit dem Boden verbunden ist.

- *Sichere Lagerung der Kreismesser:*
Durch die Abdeckung der scharfen Schneiden durch die Holzwände ist eine sichere Lagerung auch bei geöffnetem Deckel gewährleistet.
- *Einfache Beweglichkeit des Transportbehälters:*
Auf der Unterseite des Behälters sind Längsbalken befestigt, so dass der Transport innerhalb des Unternehmens, das Kreismesser verwendet, mit einem Hubwagen oder Gabelstapler einfach zu bewältigen ist.
- *Sicherer Transport auf einem LKW:*
Wenn der Behälter gefüllt ist, wird oben auf die Gewindestange eine Ösenmutter aufgeschraubt. Die Ösenmutter ragt zum Teil in den Schlitz des Gehäusedeckels hinein und ist damit gegen Verdrehung gesichert. Für den Transport wird der Gehäusedeckel mit den Seitenwänden verschraubt.
- *Mehrfachnutzung:*
Alle Teile des Behälters sind wiederverwendbar.
- *Option des sortenreinen Recyclings:*
Für den nicht wünschenswerten Fall, dass die gesammelten Kreismesser nicht weiterverwendet werden können, besteht die Möglichkeit, die Kreismesser mit einem Kran aus dem Behälter zu entnehmen und einer Schmelze zuzugeben.

1.4.2 Abbildung im ERP-System, logistische Betrachtung und buchhalterische Bewertung

Bei der Abbildung im ERP-System ergeben sich bezüglich logistischer und buchhalterischer Betrachtung folgende grundlegende Problemfelder, die über die standardmäßige Abbildung bei Prozessen mit Primärrohstoffen hinaus gehen und wie sie in allen ERP-Systemen behandelt werden:

Werden im Sinne der Kreislaufwirtschaft bereits als Originärware verkaufte Produkte vom Hersteller zurückgeholt, um sie dem Kreislauf wieder zuzuführen, ergeben sich beim Hersteller neue Prozesse im realen Leben. Diese werden üblicherweise auch eine Entsprechung in den in der IT abgebildeten Prozessen finden müssen. Davon abgesehen, ergeben sich auch neue Themen im Bereich Bestandsführung und Bewertung, die zu weiterem Anpassungsbedarf in der ERP-Software führen.

Es ergeben sich die folgenden hauptsächlichen Problemfelder:

- Identifikation fremder Ware falls gewünscht / relevant
- Informationen zum Auslieferungs-Zustand
- Änderungen durch Aufenthalt / Gebrauch / Dauer bei (unbekannten) Endkunden
- Aussagekräftige Lagerinformationen bei heterogenem und / oder unbekanntem Zustand der RE- Ware
- Anreize und Durchführung der Rückholung
- Finanzielle Bewertung der heterogenen Sekundärware (neue Prozesse und undefinierte Zustände)
- Verkaufseinheit / -preisgestaltung für unbestimmbare Qualitäten und Zustände

Diese Problemfelder werden im Folgenden entlang des Prozessablaufes behandelt und qualifizierte Lösungsansätze skizziert. Der betrachtete Prozessablauf ist dabei wie folgt:

1. Produktion der Originärware
2. Verkauf der Originärware
3. Versand der Originärware
4. Nutzungsphase der Originärware

5. Rückholung der ehemaligen Originärware
6. Wareneingang der ehemaligen Originärware
7. Bewertung der eingegangenen Ware
8. Verkauf als Sekundärware
9. Aftersales Sekundärware

1.4.2.1 Produktion

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollen zurückgeholte ehemalige Originärprodukte auf möglichst hochwertige Art und Weise dem Kreislauf wieder zugeführt werden. Die möglichst hochwertige Wiedereinspeisung in den Kreislauf korreliert dabei - neben den ökologischen und sozialen Zielen der Kreislaufwirtschaft - auch mit den ökonomischen Interessen des Herstellers.

Um eine entsprechende Zuführung zu ermöglichen, ist es förderlich, so viel wie möglich über die Eigenschaften der zurückgeholten Originärware zu wissen. Dabei gilt die IT-Maxime, dass Daten da am einfachsten erfasst und gespeichert werden, wo sie anfallen. Das beginnt bei der Produktion der Originärware. Es sollten möglichst alle verfügbaren Daten zum Originärprodukt während der Produktion durch die IT erfasst und zum Produkt gespeichert werden. Da bei Verkauf der Originärware üblicherweise nicht bekannt ist, in welchem Zustand die Originärware zurückkommt und für welchen Folgezweck sie dem Kreislauf wieder zugeführt wird, ist es nach Rückholung für die Bestimmung der aus Kreislaufsicht bestmöglichen weiteren Verwendung dienlich, so viele Informationen wie möglich zu haben, da eben im Vorhinein nicht bekannt ist welche Informationen dann im Nachhinein zu eben dieser Bestimmung benötigt werden.

Das führt zu folgenden Anforderungen:

- Genaue Dokumentation über eingesetzte Materialien & Produktionsprozess
- im Allgemeinen (Arbeitsplan, Stückliste) und
- im Speziellen (Produktionsbedingungen bei Herstellung)
- Hinterlegung aller relevanten Daten zum einzelnen Artikel / Produktionscharge
- Identifikation der einzelnen Artikel im Lager

Üblicherweise sind im ERP-System Arbeitspläne und Stücklisten für die hergestellten Produkte hinterlegt.

Ganz allgemein sind dabei in der Stückliste die Materialien (inklusive Hilfsmaterialien wie Schmiermittel etc.) hinterlegt, die zur Produktion verwendet werden und im Arbeitsplan die Arbeitsschritte der Produktion, also an welchen Arbeitsplätzen und Maschinen in welcher Reihenfolge welche Arbeiten und Änderungen am eingesetzten Material erfolgen – inklusive Zuordnung der eingesetzten Materialien zu den einzelnen Arbeitsschritten. Da diese Arbeitspläne und Stücklisten über die Zeit Änderungen unterworfen sind, sollte für diese beiden Strukturen eine Änderungshistorie hinterlegt werden. Das heißt, dass die verschiedenen verwendeten Versionen alle hinterlegt sind und bei der Produktion einer Ware bekannt ist und gespeichert wird mit welcher Version von Arbeitsplan und Stückliste die Ware produziert wurde.

Im Speziellen sollten auch die Daten zum Originärprodukt gespeichert werden, die beim einzelnen Endprodukt dann tatsächlich verwendet wurden (Charge der eingesetzten Schmiermittel, Seriennummer des verwendeten Vorproduktes etc.).

Diese Daten sollten möglichst der einzelnen produzierten Originärware zugeordnet werden. Das setzt voraus, dass die einzelnen Produkte eine eindeutige Seriennummer erhalten und diese auf dem Produkt

auslesbar hinterlegt wird und die Verknüpfung der Daten mit der Seriennummer im ERP-System nachverfolgbar gespeichert wird. Für die Sammlung weiterer relevanter Daten im Folgeprozess sollte die Serialnummernzuordnung zum einzelnen Produkt auch während der Lagerung / Auslieferung zum Kunden verfolgbar sein.

Als Effekt dieser Datenspeicherung sind (eindeutige Identifikation des einzelnen Originärprodukts vorausgesetzt) bei Rückholung alle Informationen zum Auslieferungszustand vorhanden, was eine optimale Verwendung im Kreislauf des rückgeholtten Gutes ermöglicht.

1.4.2.2 Verkauf

Beim Verkauf sollen genau wie bei der Produktion möglichst viele Daten gesammelt und zum einzelnen verkauften Produkt hinterlegt werden. Zudem sind gegebenenfalls bereits beim Verkauf neue Prozesse nötig, um dem Kunden bereits beim Verkauf Anreize zu geben, die Ware nach Verwendung nicht zu entsorgen, sondern dem Hersteller zurück zu senden. Diese Incentives sind gegebenenfalls buchhalterisch gesondert zu behandeln und bei Rückholung der Bewertung der eingegangenen Ware aufzuschlagen. Besonderes Augenmerk dabei ist auf die Umlage auf die vereinnahmte Menge in Bezug auf die verkaufte Menge zu richten, da zu erwarten ist, dass nicht 100 % aller verkauften Ware auch den Weg zurück zum Hersteller findet. Das bedeutet die für 100 % der verkauften Ware gewährten Rabatte erhöhen summarisch in voller Höhe den Wert der zurück geholtten Ware, auch wenn diese nur zu einem Bruchteil wieder beim Hersteller ankommt. Dieser Punkt wird im weiteren Prozessverlauf noch detaillierter beschrieben.

Bezüglich der Verkaufsprozesse ergeben sich folgende Anforderungen:

- Genaue Dokumentation der Verkäufe
- nach Produkt mit Produkthierarchie
- bis zum einzelnen identifizierbaren Artikel bereits im Verkaufsbeleg / Bestellbestätigung zum Kunden
- Dies erfolgt gegebenenfalls erst bei der Erzeugung des Lieferscheins (siehe Prozessschritt Versand durch Zugriff auf Lieferscheindaten (Zugriff muss sichergestellt werden) oder Verkaufsbeleg ergänzen im Nachgang
- Gewährte Incentives nach Art und Höhe
- Vertriebsweg
- Kundenhierarchie
- Berücksichtigung der Rückholung beim Verkauf über Rabatte, Mietmodelle etc.
- Speicherung der Daten zum verkauften Einzelartikel

Wie ausgeführt sollten bei der Produktion und in den einführenden Sätzen zum Kapitel Verkauf alle Daten des Verkaufsbeleges und über diesen zum Kunden dem verkauften einzelnen Produkt zugewiesen und entsprechend abgespeichert werden.

Da in vielen Fällen die Zuordnung des tatsächlich ausgewählten einzelnen Produktes erst mit der Lieferung / dem Versand erfolgt, ist es notwendig entweder beim Versand die Informationen zum Verkaufsbeleg beim Produkt im Nachgang zu hinterlegen oder den Durchgriff der Daten unter den Belegen zu gewährleisten. Je nach Art der verkauften Waren kann es relevant sein zu wissen, an genau welchen Kunden die Ware verkauft wurde, da die Nutzung des Produktes als Originärware und damit die Beeinflussung der Merkmale der zurückgeführten Ware Unterschieden unterliegen mag, je nach dem welcher Kunde die Ware wie beansprucht. Dazu gehören auch Informationen zum Einsatzort (große Höhe, hohe oder fehlende Luftfeuchtigkeit, besonders hohe oder tiefe Temperaturen,

Luftverschmutzung etc.) sowie der Art des Einsatzes und der Pflege der Ware. Ebenso können eine längere Verweildauer bei Zwischenhändlern sowie die damit einhergehenden Lagerbedingungen einen Einfluss auf die Ware haben.

Da die zurückgeholte Ware je nach Zustand oder grundsätzlicher Art der Erstverwendung möglicherweise nicht mehr als Einzelstück, sondern nur als Bulkware verwertet werden kann macht es Sinn sich bereits beim Verkauf eine gegebenenfalls zusätzliche Produkthierarchie zu entwickeln, welche die Produkte auf eine Art und Weise gliedert, die bei der Zuführung zum Kreislauf nach Rückholung jeweils einheitlich betrachtet werden kann. Das gilt insbesondere nicht nur für die technische Verwertung nach Rückholung, die im Zweifel auch im Nachgang erfolgen kann und Änderungen unterworfen sein mag, sondern speziell auch für die gemeinsame Betrachtung der Incentives in Hinblick auf die buchhalterische Behandlung bei Verkauf und Wiedervereinnahmung.

1.4.2.3 Versand

Spätestens beim Versand fallen Informationen an, die bereits im Kapitel zum Verkauf angesprochen wurden. Insbesondere die genaue Zuordnung der verkauften Ware zum Kunden und darüber hinaus auf das erste geographische Zielgebiet ergeben sich durch die Versandpapiere, ebenso die Informationen zu Zwischenhändlern. Folgende Informationen haben einen möglichen Einfluss auf Prozess und Ware:

- Versandweg, soweit dieser Einfluss auf die Ware hat
- Zwischenlager
- Endkunde
- Versand in Verpackungen, die eine Rückholung ermöglicht
- dazu ggfs. mehrere Ebenen wegen Mengengerüst (Zwischenhändler, Endkunde)
- Verpackung, die sich für mehrmaligen Gebrauch eignet
- ggfs. für unterschiedliche Produkte gemeinsam
- und platzsparend gelagert werden kann.

Beim Verkauf oder Versand über Zwischenhändler ist zu überlegen, inwieweit man die weiteren Zwischenhändler und Endkunden motivieren / inzentivieren kann, Informationen zum endgültigen Einsatz anzugeben. Das gilt insbesondere bei Verwendung im ursprünglichen Verwendungszweck über mehrere Endkunden (Beispiel Gebrauchtfahrzeug), bei dem es hilfreich wäre, über alle Endkunden hinweg Informationen zu Umständen und Verwendung zu erhalten.

Grundsätzlich ist auch bereits beim Versand zu bedenken, wie die logistische Abwicklung der Rücksendung erfolgen muss. Im Falle TKM ist das Originärprodukt scharfkantig und daher sowohl im Handling gefährlich als auch bei Versand speziell zu sichern, um eine Gefahr für die Personen auszuschließen, welche die Ware verwenden bzw. transportieren. Die Ware muss daher bereits beim Versand an den Ort der originären Verwendung so verpackt werden, dass diese Verpackung auch für einen sicheren Rücktransport genutzt und mehrfach verwendet werden kann.

Je nach Produkt und Vertriebskanälen kann es notwendig werden, die Versandverpackung für den Verkauf an Zwischenhändler (Großhändler) kaskadenartig zu gestalten und den Rücktransport dann auch über die Zwischenhändler abzuwickeln. Dabei ist neben der Fähigkeit zur Mehrfachverwendung auch daran zu denken, dass die Verpackung ggfs. platzsparend beim Endkunden und Zwischenhändler gelagert werden kann, um eine Rückführung nicht bereits am Platzbedarf und den damit verbundenen Kosten beim Endkunden scheitern zu lassen.

Bei der Verwendung einer Verpackung mit der Möglichkeit der Mehrfachverwendung ist zu beachten, dass dadurch je nach bereits vorhandenen Prozessen auch buchhalterisch neue Prozesse entstehen. Verpackung, die dem Kunden mit dem Produkt kostenfrei überlassen wird, erzeugt bei der Rückholung einen Wareneingang der Verpackung mit entsprechender Wertzuführung (siehe folgende Kapitel). Wird die Verpackung dem Kunden leihweise überlassen, ist auch das ggfs. mit einem neuen Prozess im Bereich Verkauf und Buchhaltung verbunden. Insbesondere ist hier zu beachten, wie mit nicht zurück gesendeten Verpackungen verfahren werden soll, da hierdurch entweder Kosten beim Kunden entstehen (für nicht zurück gesendete Ware) oder der Hersteller dem Kunden eine Gutschrift über die Mehrwegverpackung im Wert der Verpackung erstellen muss. Hierdurch ergeben sich buchhalterische Auswirkungen sowohl beim Hersteller als auch beim Endkunden.

1.4.2.4 Nutzungsphase

Die Originärware unterliegt in der ersten Phase der Verwendung beim Endkunden Einflüssen durch die grundsätzliche Nutzung sowie den spezifischen Umständen beim Gebrauch, die bei Bedarf und Gelegenheit gesammelt und dem einzelnen Produkt zugeordnet werden sollten. Es empfiehlt sich der Aufbau einer Datenbank die

- Gebrauchsspezifika und
- Auswirkung auf die Ware sammelt
- und die Verknüpfung der gesammelten Daten mit den einzelnen Artikeln sicherstellt.

Neben der Tatsache, dass jeder Kunde die Ware unterschiedlich einsetzt, ergeben sich durch klimatische Gegebenheiten, Wärme- Feuchtigkeitsquellen im direkten Umfeld des Einsatzes etc. unterschiedlichste Auswirkungen auf die Originärware, die ggfs. Auswirkungen wiederum auf die weitere Verwendung in der Kreislaufwirtschaft haben. Beispielhaft hat der Grad der Ausnutzung der Kreismesser von TKM Auswirkungen auf die verwertbare Restmenge an Material. Bei anderen Metallprodukten kann eine übermäßige Hitzeeinwirkung während des Gebrauchs das Gefüge und den Härtegrad verändern.

Je nach Produkt eignen sich eingebaute elektronische Komponenten und Sensoren, um Daten zu sammeln die ggfs. auch für die vorbeugende Wartung oder rechtzeitigen Austausch eingesetzt werden können. Sollten sich keine direkten Daten sammeln lassen, ist es sinnvoll zumindest die allgemeinen Umstände des Einsatzes wie durchschnittliche Nutzungsdauer, klimatische Bedingungen etc. zu sammeln und diese dem Produkt zuzuordnen.

1.4.2.5 Rückholung

Die Rückholung der Originärware ist ein weiterer Prozess, der im realen Leben eingeführt und in der IT abgebildet werden muss.

- Implementierung von Prozessen zur Rückholung
- Anreizsysteme für den Endkunden ggfs. Zwischenhändler
- Vergütung oder Rabatte für den Kunden,
- Unterstützung bei Verpackung, Versand
- Kostenübernahme
- Gutschriftverfahren für Rückvergütungen

Neben der Organisation der logistischen Aspekte der Rückholung (siehe unter anderem den Prozessschritt zur Verpackung), wird es meist notwendig sein, den Endkunden und je nach

Durchführung auch die Zwischenhändler durch geeignete Anreizsysteme zum Rückversand zu motivieren.

Dies kann zum Beispiel durch Vergütungen für die zurückgesendete Ware oder Rabatte für neue oder die zurück gesendete Ware erfolgen. Ebenso sollten Prozesse implementiert und abgebildet werden die den Endkunden bei Verpackung (siehe oben) und Versand unterstützen z.B. durch Abholung der Ware durch einen geeigneten Logistik-Dienstleister. Durch den Einsatz eines entsprechend geschulten Logistik-Dienstleister lässt sich eventuell auch das Thema der Verpackung ohne mehrfach verwendbare Verpackung lösen, was aber in Teilen den Kreislaufaspekt konterkariert.

Ein wichtiger Aspekt wird neben der Hilfe bei dem Aufwand mit dem Rückholprozess auch die Übernahme der damit verbundenen Kosten sein, um die Quote der zurück gesendeten Ware zu erhöhen. Kosten und Aufwand beim Endkunden lassen sich auch durch die Einführung eines Gutschriftverfahrens für die möglicherweise ausgelobte Bezahlung verringern. Dieses ist in der IT entsprechend abzubilden. Je nach ERP-System sind neben rein buchhalterischen Prozessen auch neue Bestellarten anzulegen.

1.4.2.6 Wareneingang / Einlagerung

Der größte Bedarf an zusätzlichen Prozessen und dementsprechenden Ergänzungen der IT ergibt sich im Bereich Wareneingang / Einlagerung / Bewertung der zurück geholten Waren.

- Dokumentation über
 - Identität des Einzelartikels, Menge, Qualität, (Aus-)Nutzung der Verpackung
 - Ergänzung der Informationen aus dem Verkauf / Versand, Nutzungsphase, Rückholung
- Vereinnahmung in Qualitäten
 - Einzelware
 - Sammelware
 - Q-Bestand zur genauen Zuordnung
- 2 Materialnummern für jede Einzelware
 - verkaufsfähig
 - und zur Revision
- Materialnummern für Sammelware
 - Zusammenfassung für mehrere Ursprungsmaterialien
 - Mehrere Materialnummern je nach Verwendungsmöglichkeit der RE-Ware entsprechend unterschiedlicher Qualitäten
 - Möglicherweise andere Lagermengeneinheit in Gewicht statt Stück
 - Durch Überarbeitungsauftrag Überführung von Sammelmaterial auf Einzel-Artikel oder andere Qualität, dadurch ggfs. Änderung der Einheit
- Individualisierung
 - Bei Einzelartikeln eigene Seriennummer mit Bezug zur Ursprungsnummer
 - Bei Sammelartikeln Seriennummer für eine Charge
- Zusammenführung Ursprung / Rückholung Verkauf RE-Ware
 - Möglichkeit eines speziellen Lagerplatzes, auf dem Ware aus der Rückholung gesammelt wird bis zu einer Maximalmenge, dann Entnahme daraus bis zur endgültigen Leerung über Verkauf / Verschrottung ohne Nachfüllen.
 - Dadurch Verknüpfung dezidierter Informationen aus dem Ursprungsmaterial, den Rückhollieferungen und den verkauften Mengen
 - Seriennummer oder Chargennummer pro Lagerfüllung verwenden zur Identifikation

Beim Wareneingang ist die ursprüngliche Einzelzuordnung der Originärware zu ermitteln (z.B. Serien- oder Chargennummer) und im System bei dem entsprechenden Produkt der Eingang zu hinterlegen. Je nach Produkt sind dabei zusätzlich Informationen zu Mengen, Größen, Gewicht etc. der durch Gebrauch geänderten Ware zu erfassen. Ebenso für den Prozess der (Mehrfach-)Verpackung Informationen über (Aus-)Nutzung der dafür vorgesehenen Verpackung, Zustand der Verpackung und ähnliches. Ebenso lassen sich möglicherweise aus dem Zustand der Ware Informationen aus dem Verkaufsprozess über Zwischenhändler oder dem Versand und der Nutzungsphase ermitteln, die dem einzelnen Produkt dann zugeordnet werden können. So kann z.B. bei einem (aus Sicht des Herstellers anonymen) Verkauf über Zwischenhändler ermittelt werden, welcher Kunde die Ware verwendet hat, wenn über die Art des Rückholungsprozesses der Kunde bekannt wird über den Absender, das Absendeland, die Abholadresse für den Logistikdienstleister und so weiter.

Bei der Vereinnahmung kann eine erste Qualitätsprüfung und Einordnung in Qualitäten erfolgen z.B. in die drei Kategorien (aus Sicht der weiteren Nutzung)

- mögliche Einzelnutzung,
- Sammelware und
- Qualitätssicherungsbestand bei nicht direkt zuordenbarer Ware.

Die Ware, welche aus Sicht der Eingangskontrolle grundsätzlich geeignet ist, als einzelnes Stück (nicht Bulkware) wieder dem Kreislauf zugeführt zu werden, kann direkt bei der Eingangskontrolle in zwei Qualitäten vereinnahmt und unter zwei Materialnummern verbucht werden. Dabei wird unter einer Materialnummer die Ware eingebucht, die direkt zum Weiterverkauf geeignet ist und unter der anderen Materialnummer wird die Ware erfasst, die durch Revision in den Zustand versetzt wird, wieder dem Kreislauf zugeführt zu werden. Das bietet die Möglichkeit, durch einen Produktionsauftrag die eine Materialnummer in die andere zu überführen und die entsprechenden Arbeitskosten und Materialaufwände für die Revision zu erfassen und dem revidierten Material zuzuschlagen. Ebenso kann je nach Vereinbarung mit dem Kunden für die beiden Qualitätsstufen ein anderer Betrag bezahlt werden. Auch aus dieser Sicht ist die Einführung eines Gutschriftverfahrens vorteilhaft, da der Prozess hier so gestaltet werden kann, dass die Bestellung erst im Rahmen des Wareneingangs erstellt wird und damit die Unterscheidung in die Qualitäten durch den Hersteller nach Qualitätskontrolle erfolgt und nicht bereits vom Endkunden.

Bei der Vereinnahmung von Ware, die aus der Bewertung der Eingangskontrolle heraus nur als Sammelware wieder dem Kreislauf zugeführt werden kann, ist es denkbar, diese auf eine Sammelmaterialnummer zu verbuchen, mit der je nach Produkt und Hersteller mehrere Artikel im Rücklauf zusammengefasst werden. Das vereinfacht die weitere Behandlung der rückgeführten Ware minderer Qualität, was gerade bei der geringwertigen Ware die Kosten der Rückholung senkt.

Es bietet sich gegebenenfalls an, die Einzelware mit den Einheit Stück anzulegen und die Sammelware in einer Volumen- oder Gewichtseinheit. Auch hier kann im günstigen Fall die Sammelware durch Revision über einen Arbeitsauftrag in die Einzelware höherer Qualität überführt werden unter Verbuchung der entsprechenden Aufwände für Material und Arbeit.

Auch für die Waren, die dann wieder in den Kreislauf gebracht werden, sollte eine Individualisierung erfolgen im Sinne einer weiteren Rückführung sowie für die Erfassung und Weitergabe von Daten aus den originären Produkten sowie der Rückführung für den Käufer dieser Waren. Es bietet sich dabei an, für einzeln verkaufbare höherwertige Produkte wiederum eine Seriennummer zu verwenden und für die Sammelware eine Chargennummer zu vergeben.

Für die Sammelware bietet es sich an - unter dem Aspekt der Chargennummer und um die Informationen aus Erstproduktion und Rückholung zusammenzuführen und dem Käufer weiterzugeben – die rückgeholte Ware in einen Sammelbehälter zu füllen bis zur vollständigen Befüllung, ohne vorab daraus zu verkaufen und dann daraus, bis zur vollständigen Entleerung ohne nachzufüllen, zu verkaufen. Dadurch lässt sich eine eindeutige Chargennummer für diese Sammelware vergeben und alle vorhandenen Informationen als Durchschnittswert, gegebenenfalls mit Informationen zu Minimal- und Maximalwert (Einzelgewicht, ursprüngliches Produktionsjahr und ähnliches), an den Kunden weitergeben.

1.4.2.7 Bewertung

Neben den rein logistischen Themen hat in der ERP-Software auch die buchhalterische Abbildung zu erfolgen. Hier muss für die vereinnahmte Ware eine korrekte Bewertung nach Gestehungskosten durchgeführt werden. Zu den Gestehungskosten gehören neben den übernommenen Kosten für die logistische Abwicklung auch eventuelle Rabatte oder Gutschriften, welche der Endkunde und / oder der Zwischenhändler für die Rücksendung der Ware erhalten hat. Sollte der Hersteller bereits beim Verkauf der Originärware Rabatte gewährt haben, sind diese von der Gesamtzahl der verkauften Artikel auf die zurückerhaltene Ware umzulegen (geringere Anzahl). Hinzu kommen Kosten für den Wareneingang und die Qualitätsprüfung sowie gegebenenfalls die Kosten der Überarbeitung über den Produktionsauftrag und die verwendeten Materialien insbesondere bei Überführung in ein anderes Material (Sammelmaterial zu Einzelmateriale). Für diesen Prozess werden voraussichtlich bereits Standardprozesse implementiert sein. Da die Kosten für die einzelnen Waren voraussichtlich stark schwanken durch die unterschiedlichen Logistikkosten sowie unterschiedliche Aufwände für die Aufarbeitung der Ware, bietet sich an die Materialien mit einem gleitenden Durchschnittspreis zu bewerten und für ein einfacheres Controlling zusätzlich einen konstanten Planpreis zu kalkulieren.

1.4.2.8 Verkauf in den Kreislauf

Je nach Qualität der zurückgeführten Ware kann diese einzeln mit einer höheren RE-Strategie dem Kreislauf zugeführt werden oder als Sammelartikel für eine weniger hochwertige Verwendung im Kreislauf.

- Verkauf je nach Qualität der Ware über Einzelartikel
- oder Sammelartikel.
- Preismodelle berücksichtigen die Einzelqualität des Kreislaufproduktes bzw. die Konstanz der Eigenschaften bei regelmäßiger Belieferung
- Dementsprechend muss auch die Verkaufsmengeneinheit gewählt werden.

Der Käufer sollte sämtliche Daten zur Historie insbesondere der Einzelstücke erhalten, bei Sammelmaterial Information über Durchschnittsdaten sowie ggfs. Randwerte (entsprechende Maximal- und Minimalwerte)

Die qualitativen Unterschiede der Waren wirken sich auf die Verkaufsmengeneinheit aus, die für Einzelware üblicherweise in Stück und für die Sammelware entsprechend in einer Gewichts- oder Volumeneinheit gewählt werden sollte. Je nachdem welche Informationen vorhanden sind und wie diese dem einzelnen Produkt bzw. der Charge des Sammelproduktes zugeordnet werden können, bietet es sich an, dem Kunden mit der Ware möglichst die kompletten gesammelten Daten zur Verfügung zu stellen. Da die wieder in den Kreislauf geführten Produkte je nach Art des Produktes voraussichtlich bezüglich Qualität und anderer Eigenschaften nicht die Konstanz eines Primärproduktes bieten, ermöglichen die detaillierten Daten dem Kunden der Kreislaufprodukte einen bestmöglich angepassten

Einsatz, was die fehlende Konstanz in Teilen wieder aufwiegt. Hier bietet es sich eventuell auch an den Preis nicht nur an der Stückzahl oder Menge auszurichten, sondern auch die Qualität und Konstanz mit zu bewerten.

1.4.2.9 Aftersales Kreislaufware

Um das Themenfeld der Qualitätssicherung und Konstanz der Kreislaufware zu kontrollieren und zu optimieren, ist es sinnvoll, im Bereich Aftersales den Kunden der Kreislaufware möglichst detailliert zu der Qualität und Zufriedenheit mit den Produkten zu fragen, um die fehlende Konstanz und Erfahrung möglichst kurzfristig zu egalisieren.

Regelmäßige Rücksprache mit den Kunden der RE-Ware und Hinterlegung dieser Informationen im System zu den Einzelartikeln sowie dem Sammelartikel.

1.4.2.10 Lösungsansätze

Um die angesprochenen Problemfelder im Sinne der ökologischen und ökonomischen Zielerreichung möglichst optimal zu lösen, bieten sich einige Lösungsansätze an, die in Teilen bereits angesprochen wurden.

- Änderungshistorie für Arbeitspläne & Stücklisten
- Produkthierarchie zur Zusammenführung von nach außen gleichen Produkten (Beispiel Golf) aber anderer Materialnummer wegen Änderungen im Bereich Arbeitsplan und Stückliste (Beispiel Golf 1 bis ??)
- Neue Kundenart(en) für Zwischenhändler (beide Richtungen) und Endkunden
- Spezielle Prozesse für die Behandlung der Rückholung zur einfachen Kostenfindung
- Gleitender Durchschnittspreis und kalkulatorischer Preis
- Serialnummern für alle Produkte inkl. noch nicht im RE-Zyklus befindlicher.
- Serialnummern nicht sprechend, sondern fortlaufend ggfs. über die Produkte hinweg (Überprüfungskriterium bei der Rücknahme)
- Ggfs. Equipmentstamm im Falle SAP

Um möglichst genau zu wissen welche Materialien und Fertigungsansätze bei den Primärprodukten verwendet wurden, sollten für Arbeitspläne und Stücklisten Änderungshistorien angelegt werden. Dadurch ist jedem einzelnen Produkt die tatsächlich verwendete Stückliste und Fertigungsmethode zugeordnet.

Eine qualifizierte Produkthierarchie, die gegebenenfalls zusätzlich zu bereits vorhandenen Hierarchien erstellt wird, sorgt bereits bei Konstruktion, Fertigungsplanung, Fertigung, Versand (spezielle gemeinsame Rückhol-Verpackung) sowie der Logistik der Rückführung, dem Wareneingang mit Qualitätssicherung und der Lagerung und Bewertung der Kreislaufware für eine bessere Ökonomie und Ökologie, da hierdurch alle Prozesse vereinheitlicht und optimiert werden können.

Es bietet sich an, neue Kundenarten für bisher nicht im System erfasste Kunden zu pflegen wie Endkunden, Zwischenhändler und Logistikdienstleister. Dadurch lassen sich bislang nicht erfasste und unbekannte Prozesse und Daten bei diesen Kunden erfassen und den Produkten zuordnen. Logistikdienstleister, die für die Rückholung zuständig sind und von den Logistikdienstleistern abweichen, welche im Zusammenhang mit dem Vertrieb bis zum Endkunden zuständig sind, werden als neue Lieferanten angelegt. Sofern sie im direkten Auftrag des Herstellers der Primärware für die Rückholung eingesetzt werden ergeben sich dadurch allerdings voraussichtlich keine neuen Prozesse oder Stammdaten.

Angesprochen wurde auch, dass es notwendig ist spezielle neue Prozesse für die Rückführung anzulegen und die Preisgestaltung für die Sammelware über einen gleitenden Durchschnittspreis zu realisieren.

Um alle gesammelten Daten den einzelnen Primär- und Sekundärprodukten zuordnen zu können, sollten Seriennummern (SAP-Jargon Serialnummer) eingeführt werden, im Bereich der Prozessindustrie und für rückgeholte Ware, die nur gesammelt und nicht einzeln wieder in den Kreislauf geführt werden kann entsprechend Chargen.

Da die Seriennummer für den Prozess innerhalb der IT und im realen Ablauf die entscheidende (denn Daten-) tragende Rolle spielt, ist großes Augenmerk auf die Art der Seriennummer zu legen. Die Kreislaufwirtschaft steht aktuell am Anfang ihrer Entwicklung und es ist daher unabsehbar, welche Daten in Zukunft benötigt werden. Es ist daher geraten, möglichst alle Daten zu sammeln, die man ohne variablen Aufwand aus dem Prozess erhält. Ebenso ist es geraten, die Art der Sammlung so konzipieren, dass jederzeit weitere Daten gesammelt werden können und weitere Produkte aus der aktuellen oder zukünftigen Produktpalette hinzugefügt werden können. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Seriennummer als zentrales identifizierendes Element nicht nur in der eigenen IT verwendet werden können muss, sondern in allen IT-Systemen auf dem Weg des Primärproduktes über Zwischenhändler und Logistikdienstleister bis zum Endkunden und zurück.

Die Seriennummer sollte aus diesem Grunde so gewählt werden, dass sie möglichst kurz ist, keine Sonderzeichen enthält keine sprechenden Elemente und optimalerweise nur aus Ziffern ohne führende Nullen besteht. Alle Abweichungen von diesen Einschränkungen können dazu führen, dass die Nummer entweder bei einem IT-System in der Kette nicht verarbeitet werden kann oder, dass zukünftige Änderungen an Produkten, Arbeitsmethoden etc. zu Problemen in der Systematik oder der verfügbaren Anzahl an Stellen führen. Es ist daher abzuraten, die Materialart, das produzierende Werk, das exportierende Land, datumsidentifizierende Kürzel oder ähnliches in der Seriennummer zu verschlüsseln. Die Seriennummer / Serialnummer ist aus IT-Sicht ein Schlüsselbegriff zur reinen Identifikation, die dahinter liegenden inhaltlichen Informationen ergeben sich durch Zugriff auf die IT über diesen Schlüssel. Hier sind dann alle relevanten Informationen in aller Vielfalt und Tiefe verfügbar. Das gilt insbesondere auch für nicht vorhandene Informationen, die dann nur als Inhalt fehlen aber nicht durch ihr Fehlen die Erstellung der Seriennummer verhindern oder zu doppelten Seriennummern führen etc.

Im SAP-System kann unter anderem der Equipmentstamm verwendet werden, der die Möglichkeit bietet, alle erdenklichen Daten zu erfassen und nachzuhalten.

1.5 Arbeitspaket 5 – Nachhaltigkeitsbewertung

1.5.1 Definitorische Grundlagen

Im Folgenden sind die Ergebnisse und somit die theoretischen Grundlagen und Begrifflichkeiten der Circular Economy dargestellt, die literaturbasiert erarbeitet wurden. Grundsätzlich findet der Begriff der „zirkulären Wertschöpfung“ als deutsches Synonym für die Circular Economy in diesem Projekt Anwendung. Der Begriff der Kreislaufwirtschaft wird hingegen vermieden, da er aufgrund des deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes, was die Abfallbehandlung in den Fokus stellt, eine irreführende Prägung hat (KrWG, 2012).

Eine grundsätzliche Kritik gegenüber der Circular Economy ist, dass es keine einheitliche Definition der Theorie und Konzepte gibt. Das hat ein heterogenes Verständnis und eine Unschärfe in der Anwendung zur Folge. Diese Beanstandung untersuchen auch Kirchherr et al. (2017), die zunächst diese

Kritikpunkte belegen. Im zweiten Schritt erfolgt eine Analyse von 114 Definitionen der Circular Economy. Dabei berücksichtigen die Autoren auch bestehende Artikel, die in Form eines Review Artikels Literatur mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten der Circular Economy zusammenfassen. Die am meisten verwendete Definition ist demnach die der Ellen MacArthur Foundation:

„Die Circular Economy ist ein industrielles System, das durch Absicht und Design wiederherstellend oder regenerativ ist. Es ersetzt das Konzept des Lebenszyklusendes durch die Wiederherstellung, die Umstellung auf die Nutzung erneuerbarer Energien, den Verzicht auf den Einsatz giftiger Chemikalien, die die Wiederverwendung beeinträchtigen, und zielt auf die Beseitigung von Abfällen durch die Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und, in diesem Zusammenhang, Geschäftsmodellen ab.“ (Ellen MacArthur Foundation, 2012, S. 7)

Zu demselben Ergebnis kommen auch Geissdoerfer et al.(2017) und Schut et al. (2015). Die Definition findet teils in gekürzter Form Anwendung. Die Literaturanalyse zeigt zwar, dass diese Definition am meisten Anwendung findet. Sie zeigt aber auch, dass in den 114 berücksichtigten Definitionen 95 unterschiedliche Definitionen vorkommen, was die hohe Diversität verdeutlicht. Aufgrund der hohen vorliegenden Diversität sind auch die den Definitionen zugrundeliegenden Konzepte betrachten. Die Konzepte bzw. Prinzipien spezifizieren die Umsetzung der Definition. Auch hier fällt auf, dass die Literatur unterschiedliche Ansätze mit einer unterschiedlichen Anzahl an Konzepten vorhält. Gemäß den Untersuchungen von Kirchherr et al. (2017) ist zu beobachten, dass mit dem Zeitverlauf die Anzahl der Konzepte in den Ansätzen zunimmt. Eine weitere Entwicklung ist, dass sich der Fokus von den drei Strategien „Reduce“, „Reuse“ und „Recycling“ wegbewegt, was die abnehmende Anzahl an Nennungen belegt. Der ausdifferenzierteste Ansatz ist demnach der von Potting et al. (2017), der in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

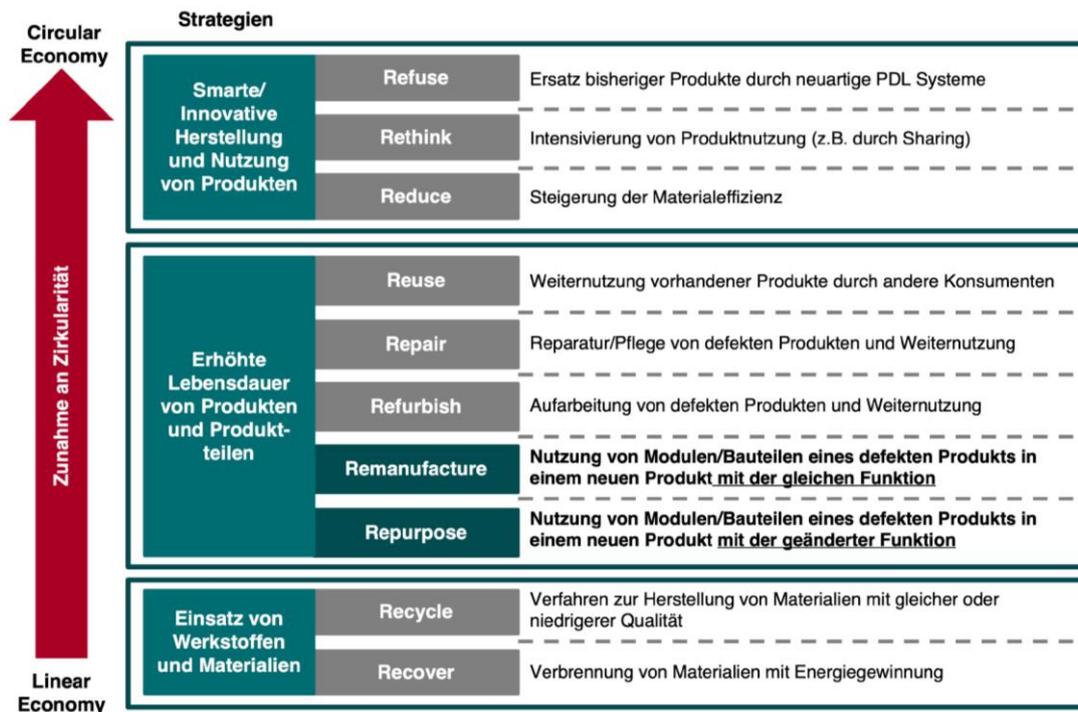


Abbildung 1-38 Die Konzepte und Strategien der Circular Economy nach Potting et al. (2017)

Das ganzheitliche Neudenken von Produkt- und Konsumsystemen ergänzt die dargestellten Konzepte, was hier durch die Zunahme der Zirkularität berücksichtigt ist. Die Darstellung schließt damit eine hierarchische Beziehung und eine geforderte Priorisierung der R-Konzepte ein. Kirchherr et al. (2017) verweisen hier auf Braungart & McDonough (2002) auf: „The authors suggest to fundamentally rethink production/ distribution and consumption processes prior to pursuing recycling and thus essentially a waste hierarchy.“ (Kirchherr et al., 2017, S. 223). Dabei bezeichnet „Rethink“ nach Potting et al. (2017) zunächst ein Konzept, was die Intensivierung der Produktnutzung mit sich zieht. Gleichzeitig stellt es das geforderte ganzheitliche Neudenken von Produktsystemen und weniger das Verfolgen von Recycling-Strategien dar.

Eine wesentliche Grundlage für das Forschungsvorhaben ist die Einordnung der Zielprodukte derer Wertschöpfungsketten Gegenstand des Projekts sind. Das erste Fallbeispiel ist im Projektvorhaben als „Remanufacturing“ beschrieben und umfasst die Fertigung eines kleineren Maschinenkreismessers aus einem größeren verschlissenen Maschinenkreismesser. Gemäß den Definitionen in der obigen Abbildung und nach dem derzeitigen Erkenntnisstand kann das Produkt dem Konzept Remanufacturing zugeordnet werden. Das Maschinenkreismesser hat in der ersten Nutzung die Funktion rollenweise Hygienepapier zu schneiden. Die gleiche Funktion erbringt auch das kleinere Maschinenkreismesser. Ob die zu entwickelnde Fertigungsroute im Detail veränderte Eigenschaften am Maschinenkreismesser bewirkt, zeigen die noch ausstehenden Untersuchungen.

Das zweite Fallbeispiel beschreibt die Fertigung von Holzbearbeitungswerkzeugen und Werkzeugen für den Dachdeckerbetrieb aus dem verschlissenen Maschinenkreismesser. Die erste Anwendung als Maschinenkreismesser erbringt die Funktion rollenweise Hygienepapier zu schneiden. Die derzeitigen Zielprodukte, ein Drechselwerkzeug und ein Pappreißmesser, haben eine andere Funktion. Das Drechselwerkzeug findet beim Abstechen von Holz Anwendung. Das Pappreißmesser hat die Funktion Dachpappen zu teilen. Gemäß des Ansatzes nach Potting et al. (2017) beschreibt das Fallbeispiel das Circular Economy Konzept „Repurposing“. In der Vorhabensbeschreibung fand stattdessen der Begriff

Reengineering Anwendung. Der Begriff ist jedoch durch einen anderen Kontext geprägt und beschreibt die Optimierung von Geschäftsprozessen. Ein wesentliches Werk stellt hier die Veröffentlichung von Hammer et al. (2003) dar. Zwar geht es im weiteren Verlauf auch um die Weiterentwicklung der Geschäftsmodelle, allerdings mit einem produktzentrierten Fokus und dem Ziel Stoffkreisläufe zu verlängern.

1.5.2 Ableitung der übergeordneten Zielgrößen

Vorbereitend für die Recherche und Analyse von ökonomischen und ökologischen Bewertungsansätzen bedarf es zudem die Bestimmung der Zielgrößen der Circular Economy. Die Zielgrößen dienen der Bewertung und Selektion von Indikatoren. Sie drücken aus, was der oder die Indikatoren darstellen müssen, um die Zirkularität der Produkte zu bewerten. Neben der zuvor herausgestellten Definition des Circular Economy Ansatzes half die Publikation von Bocken et al. (2016). Die Publikation betrachtet die Implementierung der Circular Economy im Produktdesign und in Geschäftsmodellen. Bocken et al. (2016) führten ebenfalls ein Literaturreview durch und bestimmten so zu Beginn die Strategien zur Gestaltung der Ressourcenströme. Diese sind in der nachstehenden Tabelle 1-16: aufgelistet. In der rechten Spalte sind zudem mögliche Parameter abgebildet.

Tabelle 1-16: Mögliche Zielgrößen zur Selektion und Bewertung von Indikatoren (Hagedorn et al., 2019)

Konzepte der Circular Economy	Mögliche Parameter
Schmälern des Materialflusses	Menge an Material pro funktioneller Einheit
Verlangsamen des Materialflusses	Dauer des Verbleibs der Menge an Material pro funktioneller Einheit im Produktlebenszyklus bis zur Entsorgung
Schließen von Wertschöpfungsketten	Menge an Sekundärmaterial, das Primärmaterial in der Produktion ersetzt
Reduzieren von Umweltauswirkungen	Ökologische Wirkungskategorien
Ökonomische Vorteile	Gewinn/ Kosten/ ökonomischer Wert pro funktioneller Einheit

1.5.3 Indikatorenidentifikation für Reuse und Remanufacturing

Neben den theoretischen Grundlagen ist im Rahmen des Arbeitspaketes 5 auch mit der Recherche von bestehenden Indikatoren zur Bewertung der Circular Economy begonnen worden. Wesentliche Literatur, die ebenfalls die ökologische Bewertung von Circular Economy zusammenfassend betrachtet, bilden die Publikationen von Saidani (2019), Pauliuk (2018), Elia (2017) sowie von Kristensen und Mosgaard (2020). Darüber hinaus wurden auch wesentliche Paper, die Anwendungsbeispiele im Bereich Reuse, Remanufacturing und Repurposing thematisieren, recherchiert.

Eine wesentliche Methode im Bereich Umweltbewertung ist die LCA, die in den Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 definiert ist (DIN, 2020a, b). Die Methode unterstützt das Aufzeigen von Potenzialen zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in dessen verschiedenen Phasen des Lebenszyklus. Eine solche Studie unterteilt sich in vier Phasen. Zu Beginn der Methode sind die Ziele

und Systemgrenzen festzulegen, um so den Untersuchungsrahmen zu definieren. Darauf baut das Erstellen der Sachbilanz auf. Die Sachbilanz fasst die Stoff- und Energieströme zusammen, die über die gesamte Lebensdauer als Input oder Output anfallen. Im Anschluss erfolgt die Wirkungsabschätzung, die die Umweltauswirkungen der Sachbilanz quantifiziert. Abschließend stellt die Analyse und Auswertung der Ergebnisse Hotspots und Optimierungspotenziale heraus (EN ISO, 2020a, 2020b; European Commission & Joint Research Centre, 2010).

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 steht nun die weitere Recherche und Auswertung der Literatur zu ökologischen und ökonomischen Bewertungsansätzen aus. Dabei steht die Bewertung mithilfe der identifizierten und weiterzuentwickelnden Zielgrößen sowie die Anwendung ausgewählter Indikatoren im Vordergrund.

Ziel des Arbeitsschritts 5.1 ist es ein Indikatorenset abzuleiten, der die Bewertung des 10R-Rahmenwerks erlaubt mit Konzentration auf Repurposing und Remanufacturing. Teil davon ist die Erfassung des Stands des Wissens. Hier diente eine Literaturanalyse zum Herausarbeiten bestehender Indikatoren auf Produktebene. So konnten auch deren Grenzen und bestehende Lücken aufgezeigt werden. Die Basis, insbesondere für die Analyse der Literatur, bildet die Auseinandersetzung mit den theoretischen Grundlagen. Insgesamt 16 Meta-Studien dienten der Analyse der historischen Entwicklung, zum Begriffsverständnis und der Strategien auf Produktebene. Die Ergebnisse waren bereits Teil des letzten Zwischenberichts und sind daher hier nicht dargestellt.

Darauf baute eine systematisch Literaturanalyse mit Suchbegriffen wie „Circular Economy“ + „Indicator“/ „Indicators“/ „Monitoring“/ „Metrics“/ „Assessment“. Insgesamt verblieben nach einem Selektionsprozess 52 englischsprachige Publikationen, die CE Indiktorik auf Mikro-, Meso- und Makroebene thematisieren. Da die Literatur u.a. 9 Meta-Studien umfasst, konnten ca. 100 Veröffentlichungen indirekt berücksichtigt werden. Anschließend erfolgte die Analyse der über die Literatur zusammengetragenen Indikatoren nach (1) Strategien der CE, (2) Nachhaltigkeitsdimensionen und (3) Datenverfügbarkeit.

Die Betrachtung der 52 Publikationen resultierte in einer Zusammenstellung von 224 Indikatoren auf Mikro-, Meso- und Makroebene. Insgesamt 195 Metriken adressieren die Makroebene, lediglich 3 die Mesoebene und 26 die Mikroebene. Hier ist bereits die Konzentration auf die Makroebene zu erkennen, was in einer deutlich geringeren Anzahl an Metriken resultiert. Die Analyse der Indikatoren auf Mikroebene zeigte darüber hinaus den starken Fokus auf den äußeren Kaskaden bzw. etablierten R Konzepten wie die Verwertung und das Recycling. Letztere haben aber den geringsten Grad an Zirkularität und sind als letzte Option anzusehen. Zur Bewertung der inneren Kaskaden fehlt es an Bewertungsansätzen durch spezifische und allgemeine Indikatoren. Die letztgenannten gibt es z.B. den Longevity Indikator (Franklin-Johnson et al., 2016). Da die Systemgrenze jedoch ein einzelnes Produkt ist, ist der Indikator für Repurposing nicht anwendbar.

Neben den klar identifizierten Mangel an geeigneten Indikatoren ist meist auch die Datengrundlage problematisch. So ist die Datenverfügbarkeit für die meisten Indikatoren als schlecht zu bewerten. Das betrifft sowohl Informationen entlang der Wertschöpfung als auch Produktionsprozesse beim Hersteller. Zwar sind solche Daten häufig vorhanden, jedoch nicht wie benötigt aufbereitet. Meist fehlt es an einem entsprechenden Monitoring und Reporting im Unternehmen. Ein weiteres Ergebnis der Analyse ist, dass die Nachhaltigkeit nicht ganzheitlich abgebildet ist. Stattdessen ist vor allem die ökonomische, aber auch ökologische Dimension abgedeckt. Letztere sind häufig Material-zentriert Betrachtung in Form von reinen Mengenverhältnissen. Lediglich zwei Indikatoren bilden auf Mikroebene mögliche Umweltauswirkungen ab. Die soziale Dimension fließt ausschließlich im Sustainable Circular Index mit ein (Azevedo et al., 2017).

Die Betrachtung der 3 übergeordneten Strategien nach Bocken et al. (2016) – Schmälern, Verlangsamen, Schließen, sind ebenfalls lückenhaft abgedeckt. Sowohl das Schmälern als auch das Verlangsamen von Materialströmen sind kaum Indikatoren zuordenbar (Parchomenko et al., 2019). Die überwiegende Anzahl an identifizierten Metriken bewertet das Schließen von Materialströmen. Hier zeigt sich die klare Parallele zum bereits herausgestellten Fokus auf dem Recycling.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die erste Analyse den Forschungsbedarf bei der Umsetzung und Bewertung von zirkulärem Wirtschaften in der Praxis erneut herausstellt. Hier sind klare Lücken durch die Forcierung der äußeren Kaskaden. Die Bewertungsansätze sind i.d.R. nicht im Sinne einer ganzheitlichen Nachhaltigkeit. Die Daten sind grundsätzlich vorhanden. Das Problem liegt eher in der Bereitstellung der Daten von Seiten der Unternehmen, da es ein Umdenken fordert. Ergänzend zeigte die Analyse auch, dass bestehende Bewertungsansätze aus der Nachhaltigkeitsforschung wenig Berücksichtigung bei Metriken finden. So bietet die langjährige Forschung in den separaten Themenschwerpunkten – Nachhaltigkeit, Ökonomie, Ökologie, Sozialverträglichkeit – eigene Bewertungsansätze. Hier sind z.B. die Ökobilanzierung nach EN ISO 14040/44 (DIN 2020a, b) und MIPS (Liedtke et al., 2014; Schmidt-Bleek & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 1998) zu nennen. Statt neue vereinfachte Metriken zu entwickeln, gilt es bestehende methodische Ansätze für die speziellen Anforderungen des zirkulären Wirtschaftens weiterzuentwickeln. Die Komplexität der Ansätze verhindert allerdings den einfachen Zugang und Berechnung auf Seiten von bspw. Unternehmen. Hier kann z.B. die PEF Initiative auf europäischer Ebene ein geeigneter Lösungsansatz sein.

Anforderungen		Anzahl der Indikatoren, die die Anforderungen erfüllen	Indikatoren
Prinzipien des zirkulären Wirtschaftens	Schmälern	1	Eco-efficient value ratio (Scheepens et al., 2016)
	Verlangsamern	10	Reuse Potential Indicator (Park & Chertow et al., 2014), Longevity (Franklin-Johnson et al., 2016), Extended use of products (EEA, 2016), Utility factor (EMF, 2015), Total Restored Products (Pauliuk, 2018), Lifetime of Materials on Anthroposphere (Pauliuk 2018), Material Circularity Indicator (Pauliuk, 2018) Displacement (Zink et al., 2016), Circularity Index (EMF, 2015), Ease of Disassembly Metrics (Vanegas et al., 2017)
	Schließen	16	Recycling Rate (Haupt et al., 2017), Circular Economy Performance Indicator (Huysman et al., 2017), Circular Economy Index (Di Maio & Rem, 2015), Circularity Index (Cullen, 2017), Recycling Indices for the CE (van Schaik und Reuter, 2016), Material Circularity Index (EMF, 2015), Recycling rates (Greadel et al., 2011), Ease of Disassembly Metrics (Vanegas et al., 2017)
	n.a.	1	Sustainable Circular Index (Azevedo & Godina, 2017)
Nachhaltigkeitsdimensionen	Ökologisch	20	Recycling Rate (Haupt et al., 2017), Circular Economy Performance Indicator (Huysman et al., 2017), Circularity Index (Cullen, 2017), Longevity (Franklin-Johnson et al., 2016), Extended use of products (EEA, 2016), Recycling Indices for the CE (van Schaik und Reuter, 2016), Material Circularity Indicator (EMF, 2015), Utility factor (EMF, 2015), Linear flow index (EMF, 2015), Recycling rates (Greadel et al., 2011), Total Restored Products (Pauliuk, 2018), Lifetime of Materials on Anthroposphere (Pauliuk 2018), Material Circularity Indicator (Pauliuk, 2018), Disassembly Metrics (Vanegas et al., 2017), Sustainable Circular Index (Azevedo & Godina, 2017)
	Ökonomisch	5	Reuse Potential Indicator (Park & Chertow et al., 2014), Eco-efficient value ratio (Scheepens et al., 2016), Circular Economy Index (Di Maio & Rem, 2015), Displacement (Zink et al., 2016), Sustainable Circular Index (Azevedo & Godina, 2017)
	Sozial	1	Sustainable Circular Index (Azevedo & Godina, 2017)
Datenlage	Gut	18	Recycling Rate (Haupt et al., 2017), Circular Economy Performance Indicator (Huysman et al., 2017), Reuse Potential Indicator (Park & Chertow et al., 2014), Circular Economy Index (Di Maio & Rem, 2015), Circularity Index (Cullen, 2017), Eco-efficient value ratio (Scheepens et al., 2016), Longevity (Franklin-Johnson et al., 2016), Recycling Indices for the CE (van Schaik und Reuter, 2016), , Material Circularity Indicator (EMF, 2015), Utility factor (EMF, 2015), Linear flow index (EMF, 2015), Recycling rates (Greadel et al., 2011)
	Schlecht	8	Sustainable Circular Index (Azevedo & Godina, 2017), Extended use of products (EEA, 2016), Total Restored Products (Pauliuk, 2018), Lifetime of Materials on Anthroposphere (Pauliuk 2018), Material Circularity Indicator (Pauliuk, 2018), Disassembly Metrics (Vanegas et al., 2017), Displacement (Zink et al., 2016)

Abbildung 1-39: Ergebnisse der Literaturanalyse zum Thema CE-Indikatorik auf Mikroebene (Hagedorn, Kick, et al., 2020)

1.5.4 Ökologische Bewertung von Remanufacturing

Aufbauend auf den in Arbeitspaket 1 erfassten Produktionsprozessen und den damit verknüpften Input-Daten, erfolgt die ökologische Bewertung in Form von Ökobilanzen für das Remanufacturing. Als wesentliche Annahme ist zu berücksichtigen, dass die Allokation des Stahlschrotts gemäß dem Cut-Off Ansatzes erfolgte. Für die Berechnung diente die Datenbank ecoinvent 3.6 und die Software OpenLCA. Dabei wurden die Indikatoren des kumulierten Energieaufwands (CED), des Material Footprints (MF) und Carbon Footprints (CF) berechnet. Die Analyse des Remanufacturings ist als Paper eingereicht, weshalb auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse zum aktuellen Zeitpunkt verzichtet wird.

Die Analyse zeigt die Steigerung der Materialeffizienz von 12,5 % in der konventionellen Fertigung einer 875er Ronde auf 40,4 % in der zirkulären Fertigung. Im durchschnittlichen Fall kann der CF um 65,2 %, der CED um 64 % und der MF um 80 % gesenkt werden. Einen erheblichen Einfluss hat der Rückholprozess. Auf Basis von Primärdaten erfolgte die Definition von Transportrouten mit variierender Distanz und Transportmodi. Die minimale Transportdistanz mittels LKW-Transport führt zur weiteren Reduktion aller drei Umweltwirkungskategorien. Die maximale Distanz unter Berücksichtigung des Flugverkehrs zeigt, dass der Transport grundsätzlich das Potential hat die Einsparungen zu kompensieren: Der CF ist für das Remanufacturing nun höher als für die konventionelle Fertigung. Die Einsparung des CED sinkt nur noch um etwa 10 % i. Vgl. zur konventionellen Fertigung und der MF um 78,2 %. Die Analyse zeigt auf methodischer Ebene, dass die Materialeffizienz als Proxy nicht korreliert. Insbesondere die Variation des Transports spiegelt sich in der Materialeffizienz nicht und im MF kaum wider. Der treibhausgasintensive Transport zeigt sich hier vor allem im CF und CED. Die reine

Betrachtung der Ressourcen und der Materialeffizienz kann somit irreführend sein. Außerdem zeigt die Fallstudie die Signifikanz von Zusatzprozessen, die sich nicht auf den Hauptmaterialstrom beziehen (Hagedorn, Jäger, et al., 2022).

1.5.5 Ökologische Bewertung von Repurposing

Die Berechnungen zeigen, dass die Herstellung eines 611er Maschinenkreismesser im linearen Szenario einen Carbon Footprint (CF) von 60,2 kg CO₂ eq verursacht. Der CF im zirkulären Szenario ist nahezu identisch, da sich bis auf die Abfallbehandlungsprozesse (2,9 kg CO₂ eq) keine Veränderungen ergeben. Die Produktion eines Drechselbeitels verursacht im linearen Szenario 1,3 kg CO₂ eq und im zirkulären Szenario zwischen 0,62 kg und 1,28 kg CO₂ eq. Diese Spannweite für das zirkuläre Szenario ergibt sich durch den bisher noch nicht eingestellten Schleifprozess. In der ersten Abschätzung wurde die Annahme getroffen, dass sich der Schleifprozess nicht verändert. Diese Annahme galt als vermeintlich pessimistisch, da im zirkulären Szenario lediglich ein Drittel des Materials von der Klinge durch den Schleifprozess entfernt wird. Das Begleiten der Fertigung der Demonstratoren in den Produktionshallen von Kirschen zeigte jedoch, dass sich die Dauer des Schleifprozesses bei unverändertem Schleifmittel verdreifacht. Die Zeit diente als Parameter für die Allokation der Input-Daten. Auch hier sind noch weitere Anpassungen im Produktionsprozess zu erwarten, die wiederum Auswirkungen auf das Bewertungsmodell haben. Durch die Untersuchung verdeutlichte so direkt, dass der Schleifprozess zu den wesentlichen Einflussfaktoren für die ökologische Performance des zirkulär gefertigten Produkts gehört. Durch die industrielle Symbiose und somit Kopplung der Produktsysteme sind bei der Fertigung der Drechselbeitel die Produktion des Halbzeugs und die Wärmebehandlung obsolet. Beide Prozesse sind energie- und ressourcenintensiv, was die Umweltwirkungen bzw. den CF verringert. Gemäß den berechneten Umweltwirkungen pro Produkt und der Annahme, dass sich aus einem verschlissenen Maschinenkreismesser 18 Klingen für Drechselbeitel fertigen lassen, ergaben sich aus der ersten Rechnung folgende Ergebnisse: Das lineare Szenario verursacht 83,6 kg CO₂ eq und das zirkuläre 71 kg CO₂ eq. Das bedeutet eine Einsparung von 12,6 kg CO₂ eq was etwa 15 % entspricht. Beschränkt sich die Betrachtung auf das Produktsystem des Drechselbeitels, wird also die Systemraumerweiterung außen vorgelassen, ergeben sich Carbon Footprints wie beschrieben und dargestellt (Abbildung 1-40). Die Einsparungen an Umweltwirkungen zwischen 3% und 53,7%. Diese Spannweite ist auf den bisher noch nicht eindeutig bestimmten Schleifprozess zurückzuführen. Dieser ist im nächsten Schritt weiter zu untersuchen.

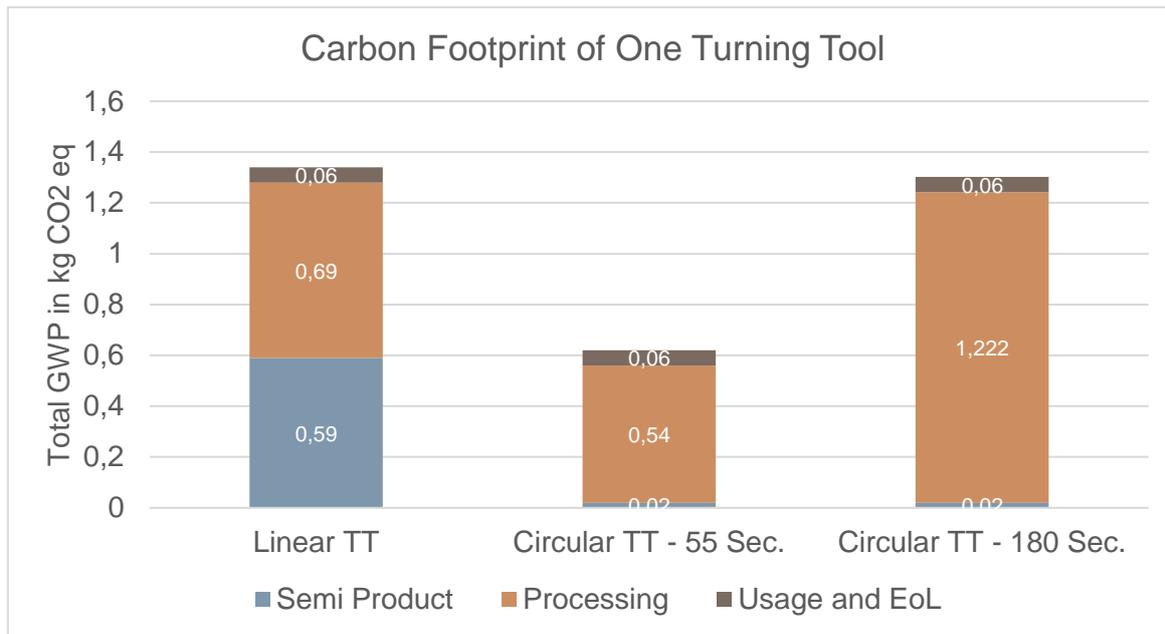


Abbildung 1-40: Ergebnisse der Literaturanalyse zum Thema CE-Indikatorik auf Mikroebene (Hagedorn et al., 2021)

Hier kann festgehalten werden, dass sich zum aktuellen Stand der Untersuchungen in beiden Betrachtungen (mit Systemraumerweiterung und mit produktbezogener Systemgrenze) eine mögliche ökologische Einsparung durch die Anwendung des CE Konzept Repurposing zeigt.

Ergänzend zur ökologischen Bewertung auf Produktebene, ergab sich eine weitere Fragestellung aus der interdisziplinären Zusammenarbeit der BUW und dem WI auf Nano- also Materialebene. So erfolgt die Modellierung von Stahl als Material häufig nicht legierungsspezifisch, da hierfür die Daten fehlen und die Erhebung zu komplex ist. Entsprechend werden Datensätze aus Ökobilanz-Datenbanken wie Ecoinvent verwendet, die jedoch nur eine sehr geringe Anzahl an Stahlsorten vorhalten. Hier schließt die Frage an, ob die Wahl der Legierung einen signifikanten und eindeutigen Einfluss auf die Nachhaltigkeitsbewertung hat und wie eine solche Bewertung aussehen kann. Im Rahmen einer Masterarbeit, die von der BUW ausgeschrieben und betreut wurde, wurde ein Ansatz zur Nachhaltigkeitsbewertung im Sinne der Triple-Bottom-Line entwickelt. Der Bewertungsansatz wurde auf die Stahlsorten des Maschinenkreismessers (1.2379) und der Drechselwerkzeuge (1.2235, 1.3343) angewendet. Insgesamt berücksichtigt das Modell 15 unterschiedliche Indikatoren auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene, die in einem Indikator zusammenfließen. Nach dem Modell liegt der Nachhaltigkeitsindex des 1.3343 am höchsten, gefolgt vom 1.2379 und dem 1.2235. Dieses Ergebnis ist in Form von Rohstoffprofilen visualisiert. Dabei ergaben sich verschiedenen Herausforderungen: Begrenzung der Bewertung auf einen Vergleich der Elemente untereinander und die zu inkludierenden Elemente, Auswahl der Indikatoren, dessen Gewichtung und Datenverfügbarkeit. Auch die immanenten Zielkonflikte innerhalb der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch, sozial), aber auch gegenüber werkstoffkundlicher Randbedingungen und der zu erfüllenden Funktion. Auch stellt sich die Frage der Relevanz einzelner Indikatoren in Relation zur Auswirkung des Produkts. Grundsätzlich gibt die Abschlussarbeit einen Überblick, was für die ganzheitliche legierungsspezifische Nachhaltigkeitsbewertung von Stahl zu berücksichtigen ist und wie dieser Fragestellung weiter nachzugehen ist. Hier schließen weitere Abschlussarbeiten an, die verschiedene Aspekte mit einer größeren Tiefe untersuchen.

1.5.6 Ökonomische Analyse

Im Austausch mit dem Unternehmen TKM wurde die wesentliche Kostenstruktur erfasst und eine Systematik für die Kalkulation erstellt. Die Kostenblöcke sind:

1. Rohmaterial
2. Maschine + Personal
3. Sales, General, Administrative
4. Verpackung
5. Hülse
6. Transportkosten

Die Erfolgchancen des Produkts sind maßgeblich von Käufermärkten abhängig. Daher sollten die Kosten so früh wie möglich antizipiert werden (FuE Phase). Der Absatzpreis wird maßgeblich durch bestehende Märkte bestimmt und fordert eine **marktorientierte Preisbildung**. TKM muss Produkte anbieten, die bzw. dessen Eigenschaften von Kund*innen gewünscht und dessen Angebot zu marktüblichen Preisen erfolgt. Das entspricht dem Target Costing Ansatz (Abbildung 1-41).

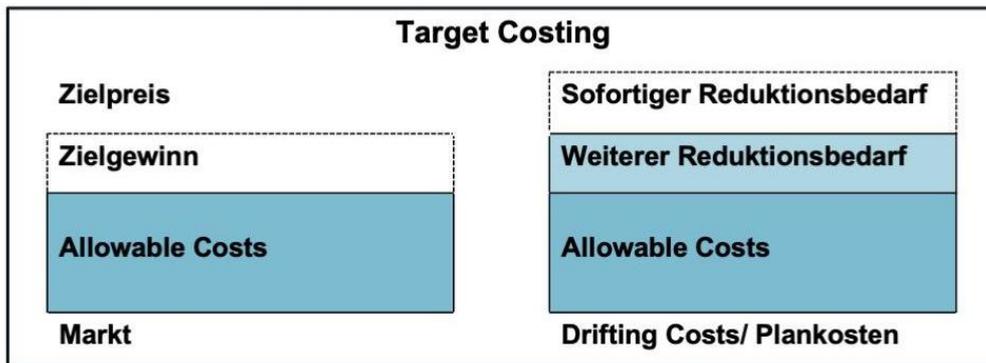


Abbildung 1-41: Ökonomische Analyse nach Target Costing (Wöhe & Döring, 2013)

Der Targetpreis ist der aktuell marktübliche Preis mit den definierten Produkteigenschaften. Abzüglich der gewünschten Gewinnspanne ergeben sich die Allowable Costs als Kostenobergrenze. Diese sind häufig kaum erreichbar. Realistische Target Costs liegen daher meist höher.

Dem gegenüber stehen Drifting Costs, also Plankosten des Status Quo. Die basieren auf z.B. Produkten in der Entwicklung oder Benchmark Preisen. Hier sind Möglichkeiten der Kostenreduktion und entsprechende Maßnahmen zu bestimmen, um die Differenz zu verringern zwischen Allowable Costs und Drifting Costs bzw. um die Target Costs zu erreichen.

Gemäß des Bewertungsansatzes wurden sowohl für die IST als auch für die SOLL Produkte die Selbstkosten bestimmt. Dabei wurden unterschiedliche, aber übliche Chargen sowie die Variation in der Distribution berücksichtigt. Insbesondere die stark variierenden und sprungfixen Transportkosten haben einen signifikanten Einfluss auf die Selbstkosten der zirkulären Produkte.

Ergebnisse Remanufacturing

Die niedrigsten Selbstkosten haben die Kreismesser, die über Landweg transportiert und extern mit Laserschneiden (min) getrennt werden. Die höchsten Selbstkosten haben die Kreismesser, die nach Übersee transportiert und extern mit Laserschneiden (max.) getrennt werden. Die Spannweite an

Kosten für das trennende Fertigungsverfahren ist zu berücksichtigen, wobei das Laserschneiden i.d.R. geringere Kosten als das Wasserstrahlschneiden verursacht. Generell ist zu berücksichtigen, dass die Kosten für das trennende Fertigungsverfahren noch weiter sinken durch das Fertigen höherer Produktionsvolumen. Insbesondere die maximalen Werte für das Laserschneiden sind als hoch zu bewerten. Die Kosten für das Rohmaterial durch die Wiederverwendung sinken signifikant und machen lediglich 8,1 % der ursprünglichen Kosten für das Rohmaterial aus. Die Kosten für die Verarbeitung des Halbzeugs (Personal + Maschine) sinkt ebenfalls deutlich (- 32,5 %). Die Transportkosten liegen um 31 % (Übersee) bzw. 181 % (Landweg) höher als im IST Szenario. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass versteckte Transportkosten im IST-Szenario z.B. im Rohmaterial möglich sind. Die Transportkosten sind signifikant. Die steigenden Transportkosten können durch andere sinkende Kostenblöcke kompensiert werden. Generell ist die Umsetzung des Remanufacturings wirtschaftlich tragfähig. Die Selbstkosten sinken um 29-52%. Nicht berücksichtigt sind dabei mögliche Kosten der Qualitätskontrollen und die mögliche Optimierung der Kosten für das Trennen und den Transport. Durch die sinkenden Selbstkosten kann entweder eine erheblich höhere Gewinnmarge erzielt oder das Produkt kostengünstiger angeboten werden. Die geringeren Selbstkosten bieten ebenfalls Spielraum die Abgabe der verschlissenen Ronden durch ökonomische Anreize attraktiver zu gestalten als die Entsorgung. Die erste Prozessentwicklung zeigte den Bedarf eines neuen Magneten für das Einspannen der Ronden in die Maschine für das Schleifen. Das wäre verbunden mit Investitionskosten. Die Investition amortisiert sich durch die geringeren Selbstkosten nach dem Verkauf einer niedrigen dreistelligen Anzahl von Kreismessern.

Ergebnisse Repurposing

Für die ökonomische Analyse gilt der Schrottpreis als Wert der zurückgeholten 611er Ronden (Minimum). Es gilt die Annahme, dass 16 Klingen aus einer Ronde getrennt werden mit einer Schnittlänge von 387,7 mm pro Klinge. Die verschlissenen Messer werden perspektivisch über den Landweg aus Deutschland und nahe europäische Länder zurückgeholt. Andernfalls ist die Rentabilität nicht gegeben. Die Aufstellung der Kosten berücksichtigt diverse Transportrouten sowie trennende Fertigungsverfahren ab dem EoL der 611er Ronde. Nicht explizit ausgewiesen sind die erhöhten Personalkosten für die Qualitätskontrolle.

Die Stückkosten für die Klingen als Halbzeug sind zwei bis siebeneinhalbfach so hoch und damit für die Projektpartner nicht attraktiv. Hinzukommt, dass die bisherige Verarbeitung bzw. Schleifprozesse nicht rentabel sind. Die bisherige Fertigung führt zu einer Vervielfachung der Bearbeitungsdauer und somit Personalkosten. Es sind weitere Investitionen für Betriebsmittel notwendig und Entwicklungskosten bei Kirschen zu berücksichtigen. Dasselbe Bild zeigt sich bei der Verarbeitung von Freund. Eine offene Frage ist auch der Ausschuss und die Arbeitssicherheit. Bei Testläufen kam es zum unerwarteten Bruch in der manuellen Verarbeitung. Diese Verlustrate ist einzupreisen und stellt einen Risikofaktor dar. Das Wasserstrahlschneiden führt zu Schnittkanten, die in der Verarbeitung mit einem geringeren Aufwand verbunden. Problematisch ist allerdings die schnelle Oxidation der Oberfläche durch das Wasser. Das Laserschneiden kann durch nicht optimal eingestellte Prozessparametern in der Verarbeitung zu Mehraufwand an den Schnittkanten führen. Zum aktuellen Stand ist die Fertigung von Halbzeug für die Projektpartner ökonomisch nicht rentabel. Die derzeitigen Selbstkosten übersteigen über ein Mehrfaches den Einkaufspreis des Halbzeugs bei den Projektpartnern. Mögliche Optimierung stellen die Ausbeute sowie die Transportkosten dar. Ein wesentlicher Kostenblock bilden die Gemeinkosten. Die interne Rechnungslegung ist unbekannt und somit auch der Spielraum. Dieser ist intern zu prüfen. Es stellt sich die Frage nach der Höhe der Grenzkosten und Marge auf Seiten TKM. Hinzukommen

mögliche Mehrkosten und Investitionen bei der Weiterverarbeitung des Halbzeugs bei den Projektpartnern. Eine deutliche Preissteigerung der Zielprodukte ist unrealistisch, da die Produkte bei den Projektpartnern eher als Einsteigerprodukte (Hobby) auf den Markt gehen sollen. Das geht mit einem niedrigeren Verkaufspreis einher als für die bestehenden Produkte für Fachpersonal.

1.5.7 Ergebnisse sortenreines Recycling

Im Rahmen des Projekts besteht die Frage, ob ein sortenreines Recycling vorteilhaft ist. Dabei wird die Idee verfolgt, dass der/die Kund*in die Ronden am EoL sammelt und gebündelt in das Recycling gibt. Derzeit ist für die Sammlung ein Stahlfass vorgesehen, was dann an TKM zurückgeschickt wird. TKM fungiert als Mittler und leitet das Fass an einen Schrotthändler (RHM) weiter. Die Idee ist, dass möglicherweise die Fässer komplett in die Schmelze gehen, sodass keine weitere Handhabung notwendig ist. Unbekannt ist der Einfluss des Fasses (Stahl, Lack und weitere Verunreinigungen) auf die Schmelze. Ein Behälter fasst bis zu 100 Ronden á etwa 5 kg. Gemäß vorliegenden Angeboten sind damit Einnahmen von 500 €/t verbunden, sprich 250 € pro Fass. Die Rückholmöglichkeiten in Deutschland sind mit Transportkosten von 174 € (min) bis 320 € (max) verbunden. Das bedeutet maximale Einnahmen von 6.080 € im Jahr. Die Betrachtung von Durchschnittswerten zeigt ein Ergebnis was gerade so rentabel ist. Im Falle der maximalen Transportkosten führt es zu Verlusten von bis zu 5.600 € im Jahr. Der potenzielle ökonomische Mehrwert (best case) für TKM ist nur gering. Im Durchschnitt gibt es keinen ökonomischen Mehrwert. Ein erheblicher Kostenblock bildet der Transport. Die Rolle von TKM als Mittler im Sinne eines Hubs ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch fraglich. Da Deutschland über eine ausgeprägte Recyclingwirtschaft verfügt, stellen lokale Schrotthändler die sinnvolleren Handelspartner dar.

1.5.8 Preis- und Marktentwicklung der Stahlproduktion

Eine These im Rahmen des Projekts war, dass Entwicklungen des Stahlmarkts dazu führen, dass die Umsetzung der zirkulären Strategien mit zunehmenden wirtschaftlichen Vorteilen verbunden ist. Das heißt, durch z.B. Verknappung und Verteuerung der Primärmaterialien ist die Verwendung von Sekundärmaterial insbesondere vor dem Umschmelzen lohnend. Dabei bleibt der Schrottpreis als Grenzkosten für den Einkauf von Materialien am EoL unverändert. Zur Untersuchung der These wurde Literatur recherchiert zu den aktuellen und zukünftigen Stahlmärkten sowie verschiedene Daten zur Preisentwicklung von Stahl, Schrotten und Legierungselementen ausgewertet. Eine häufig publizierte Annahme ist, dass sich die CE-Konzepte insbesondere vor dem Hintergrund anstehender Preisentwicklungen als vorteilhaft zeigen. Die Erwartungen sind steigende Preise für Rohstahl aufgrund eines angespannten Rohstoffmarktes und Knappheiten (Prognos 2018). So sind bei bekannten Erzvorkommen erste Verknappungen spürbar. Knappheiten sind für Eisen jedoch weniger zu erwarten als für die Vorkommen der Legierungselemente (Nuss & Eckelman, 2014).

Legierungselemente

Die Preise auf den Rohstoffmärkten entwickeln sich nicht aufgrund einer akuten Verknappung. Vielmehr ist es auf einer strukturellen Veränderung der Märkte hin zu einer starken Globalisierung. Der Rohstoffpreisindex BGR-Preisindex für Metalle (BGR-MPI) ist am deutschen Metalleinsatz ausgerichtet und zeigt die Belastung rohstoffpreissensibler deutscher Unternehmen und der deutschen Wareneinfuhr. Der BGR-MPI als statistische Kennzahl erlaubt pauschale Aussagen über die Belastung der metallverarbeitenden Industrie in Deutschland aufgrund von Preisänderungen auf den internationalen Märkten. Im BG-MPI fließen Monatspreise für 20 metallische Rohstoffe (Import) ein. In

einem Zahlenwert aggregiert kann so die Entwicklung des Preisgefüges der deutschen Metallrohstoffimporte auf der Zeitachse dargestellt werden.

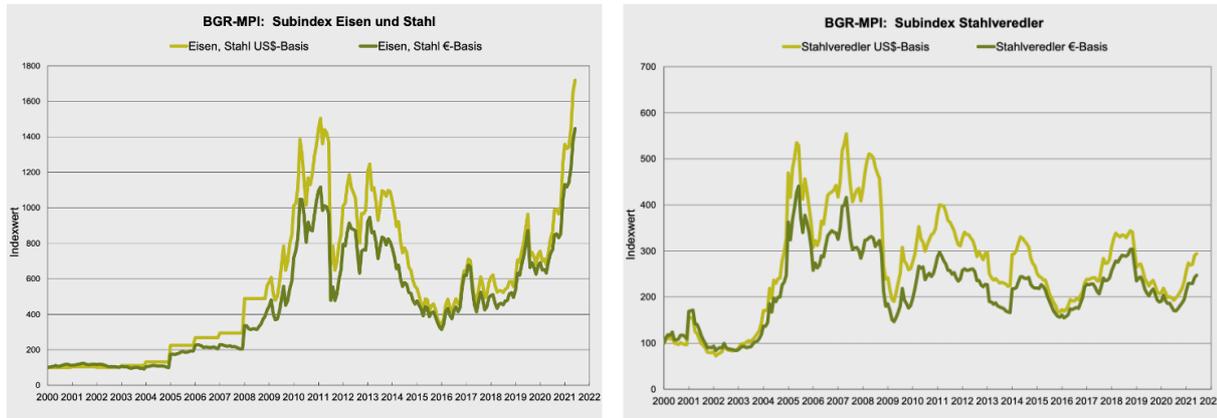


Abbildung 1-42: Preise für Eisen und Stahl (DERA, 2021a)

Grafiken: Die Preise von Rohstoffen schwanken in den letzten Jahren stark. Die Volatilität ist somit ein Risiko für u.a. die Stahlindustrie und hat direkte Auswirkungen auf den Preis von Stahlprodukten und –schrotten. Von Preissteigerungen sind insbesondere Eisenvorlegierungen betroffen. Beispielsweise im Juni 2021 stieg der Preis von Molybdän um 68% und Ferrovandium um 12% im Vergleich zum Vormonat. Die dargestellte Entwicklung von Molybdän ist stark von den knappen Verfügbarkeiten und den gleichzeitig hohen Nachfragen in Europa geprägt. Der Außenhandel mit China ist durch hohe Transportkosten und langfristige Lieferzeiträume bestimmt. Die langfristige Preisänderung liegt bspw. bei +16,2% für Molybdän, bei +13,4% für Mangan, +34% für Nickel und bei +12% für Silizium. Grundsätzlich sind aber auch Preisabnahmen möglich wie Niob (-14,9%) und Chrom (-17,8%) zeigen (DERA 2021b, DERA 2021c).

Stahlmarkt und -preis

Grundsätzlich gilt, dass Deutschland zu 100% importabhängig ist hinsichtlich Eisenerz und Legierungselementen. Die Materialkosten haben zudem den größten Teil an Produktionskosten. Schrott ist ein kostengünstiger Rohstoff im Vergleich zur Stahlherstellung im Ausland, wo Preise teils artifiziiell gelenkt werden durch z.B. Zölle und tarifäre Handelshemmnisse. Preisschwankungen auf globalen Rohstoffmärkten zeigen sich ebenfalls im Marktvolumen des Handels. Das gilt auch für Sekundärrohstoffe der Kreislaufwirtschaft. Zwischen 2010 und 2016 gab es eine Überkapazität an Rohstahl auf dem Markt. Das wirkte sich auch auf den Handel mit Eisen- und Stahlschrotten aus. Das Einfuhrvolumen nahm um 25% ab, bzw. 1,9% p.a. Der Importwert sank um 50%. Auch der Exportwert erfuhr eine negative Entwicklung mit -4,3% p.a. Hier besteht eine Preisabhängigkeit zwischen Eisen- und Stahlschrotten und der globalen Produktion von Primärstahl.

Es besteht eine klare preisliche Abhängigkeit zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen und dessen Einsatz in der Stahlproduktion. In den dominierenden Produktionsrouten sind diese jedoch nicht vollständig voneinander trennbar. Es gibt keine reine Primär- oder Sekundärproduktion. Die dominierenden Produktionsrouten sind das Elektrostahlverfahren (EAF) und der Hochofen (BOF). Im EAF kommt zum Großteil Schrott als Rohstoff zum Einsatz. Hier kommen dennoch Primärmaterialien im Rahmen der Gattierung, also das Einstellen von Legierungen, zum Einsatz. Die Stahlproduktion im BOF basiert vor allem auf Primärrohstoffen. Hier kommen Schrott zum Beispiel zum Kühlen zum Einsatz (Hiebel und Nühlen 2016). Es besteht also eine gegenseitige Abhängigkeit und keiner der beiden Produktionsarten basiert nur auf Primär- oder auf Sekundärrohstoffen.

Die preisliche Entwicklung von Stahl als Halbzeug und Schrott ist dynamisch. Das zeigt der abgebildete Erzeugerpreisindex für unterschiedliche Halbzeuge aus Stahl sowie der Großhandelsverkaufspreis für Stahlschrotte. Die Daten entstammen dem statistischen Bundesamt. Die Halbzeuge sind entsprechend der Produktanwendungen von TKM, Kirschen und Freund ausgewählt. Die Kategorien "Metalle" sowie "Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen" sind übergeordnete Kategorien und fassen Unterkategorien zusammen. Die drei Halbzeugarten sind somit Teil der Kategorien "Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen", welche wiederum Teil der Kategorie "Metalle" ist. Die dargestellte Preisentwicklung verdeutlicht einerseits die Preissteigerung aller Kategorien über einen langen Zeitraum. Gleichzeitig zeigt die Abbildung auch die Preisschwankungen. Der starke Preisanstieg ab dem zweiten Quartal 2020 ist auf die Corona-Pandemie zurückzuführen. Das Roheisen, der Stahl und die Ferrolegierungen sowie die unterschiedlichen Stahl-Halbzeugarten folgen einer vergleichbaren Entwicklung. Ausnahme bilden hier die Flacherzeugnisse, dessen Preisniveau signifikant niedriger ist. Der Verlauf des Großhandelsverkaufspreis weist einen ähnlichen Verlauf. Jedoch ist der Schwankungsbereich wesentlich größer. Das zeigt auch noch einmal deutlich die relative Preisentwicklung.

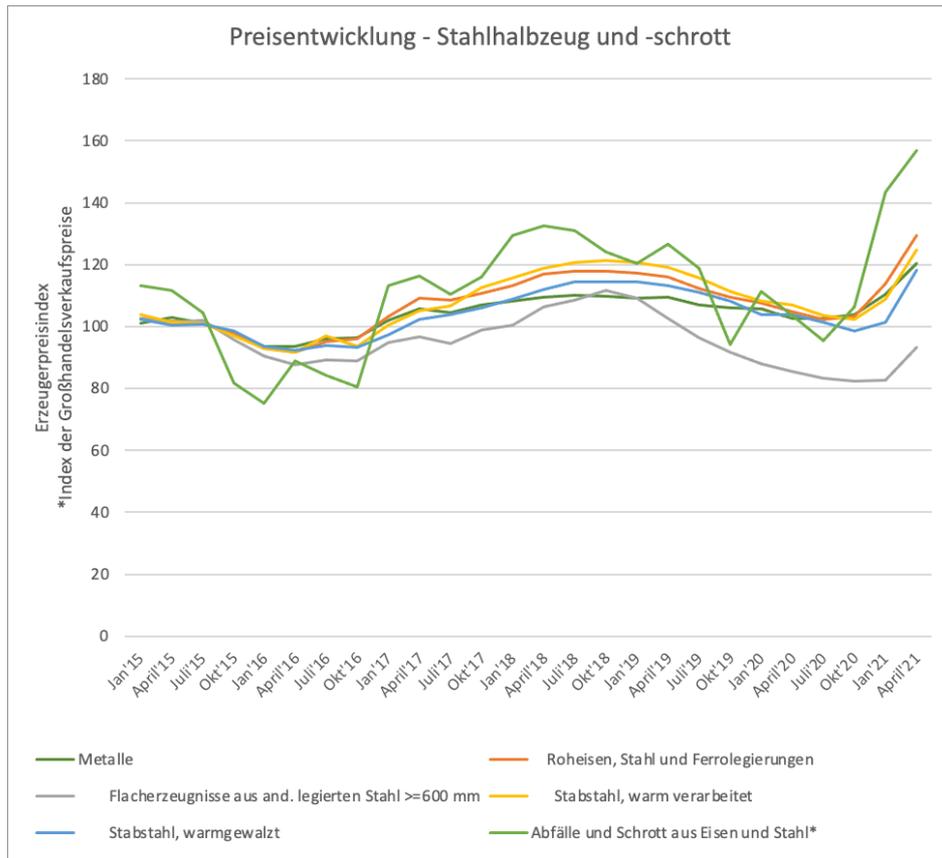


Abbildung 1-43: Preisentwicklung – Stahlhalbzeug und Schrott (destatis, 2021)

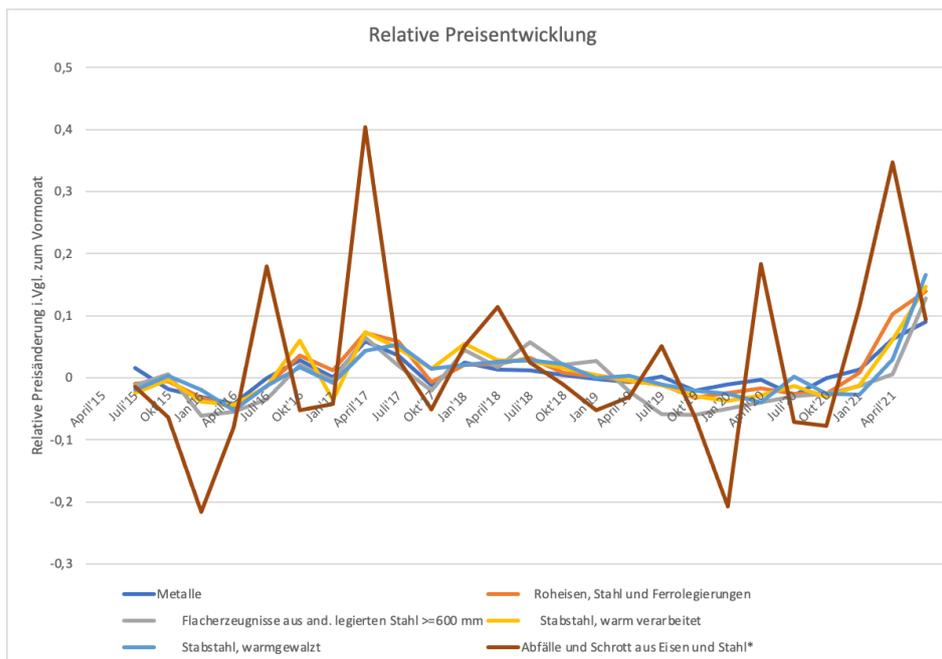


Abbildung 1-44: Preisentwicklung – Stahlhalbzeug und Schrott (relativ)(destatis, 2021)

Weitere Einflussfaktoren

Die Klimakrise drängt auch auf die Entwicklung und Nutzung neuer technologischer Lösungen zur Dekarbonisierung der Stahlproduktion. Technischen Lösungen sind z.B. Carbon Capture Storage, Wasserstofftechnologien und Elektrolyse (Fishedick et al. 2014). Die Umsetzung von beispielsweise Wasserstofftechnologien verursacht Investitionskosten und beeinflusst somit den Preis. Eine Implementierung solcher Technologien führt gemäß Mayer et al. (2019) auf europäischer Ebene zu Preisanstiegen und möglichen Verlusten des GDPs. Einen wesentlichen Einfluss hat auch die CO₂-Bepreisung. Auf deutscher Ebene ist ein mögliches Szenario, dass die Folgen des Preisdrucks zur Stilllegung der Hochofen-Konverter-Route bis 2035 führen. Das Ziel der Emissionsminderung in Deutschland wird durch die Verdrängung ins Ausland erreicht. Es handelt sich dabei um Carbon Leakage. THG-arme Herstellungsverfahren bewertet die Studie jedoch als nicht rentabel, weshalb diese nicht berücksichtigt sind (Prognos 2020). Durch die dargestellten Studien wird die Globalisierung des Stahlmarktes deutlich. Mögliche Entwicklungen der zukünftigen globalen Stahlnachfrage sind Teil einer Studie der OECD (2019). Einer Erhöhung der Ressourceneffizienz in den stahl-intensiven Industriesektoren in China und Indien kann demnach zu einer Verringerung des Stahlpreises bis 2060 führen. Insbesondere China und Indien haben einen hohen Stahlbedarf für den Aufbau der Infrastruktur. Die Mengen an Stahl in den anthropogenen Lager steigen. Die Erhöhung der Ressourceneffizienz im Bereich Bau, Automobil, Metallprodukte und Maschinenbau kann zu einer Senkung des Stahlinputs führen. Das führt zu einem erheblichen Rückgang in der Stahlnachfrage bzw. -produktion, was sich auf den Preis auswirkt.

Zusammenfassung Preisentwicklung:

Untersuchungen zeigen vor allem Volatilität der Legierungselemente, des Rohstahls und des Stahlschrotts sowie Anfälligkeit für Krisen. Mittel- bis langfristige Prognosen gibt es eher hinsichtlich der Mengenströme als der wirtschaftlichen Entwicklung. Die Nachfrage nach Primärstahl geht langfristig (bis 2050/2060) zurück und der Anteil an Sekundärmaterial nimmt zu. Durch die steigende Gesamtnachfrage und den Aufbau der anthropogenen Lager in Schwellen- und Entwicklungsländern ist jedoch eine signifikante Abhängigkeit von primären Rohstoffen weiterhin gegeben (OECD, 2019; Pauliuk et al., 2013; Raatz et al., 2022). Der Preis ist aber nicht nur abhängig von der Nachfrage, sondern vom Preisdruck, der durch vielfältige Faktoren beeinflusst wird: Transportkosten, Verfügbarkeiten, Krisen, Zölle, Konjunktur, Politik etc. Auch zeigen die Graphen, dass sowohl die Schrotte als auch Metalle einen ähnlichen Verlauf haben. Zudem sind sowohl Primär- als auch Sekundärmaterialien in der Produktion miteinander gekoppelt.

Das heißt, eine Erhöhung des Preisdrucks führt zu einem Preisanstieg der Primärmaterialien und vermutlich parallel zu einem Preisanstieg für die Schrotte. Für die Sicherstellung der des Rücklaufs an Ronden muss TKM den Kaufpreis flexibel anpassen, um die lukrativere Abgabe an den Schrotthandel bei hohen Schrottpreisen zu vermeiden. Alternativ kann durch die Vertragsgestaltung eine Verbindlichkeit/ Bindung erreicht werden, wodurch sich der/die Kund*in zur Rückgabe verpflichtet. Hier ist dennoch eine attraktive Preisgestaltung grundlegend.

1.6 Arbeitspaket 6 – Regionalwirtschaftliche Übertragbarkeit

Für die Untersuchung der regionalwirtschaftlichen Übertragbarkeit wurden zunächst die relevanten Faktoren für die produktspezifische Anwendung des Remanufacturings und Repurposings im Rahmen

von Workshops bestimmt. Die unterteilen sich in die Bereiche Material & Fertigung und ökonomisch & ökologisch. Wobei erstere Ausschlusskriterien sind.

1.6.1 Faktoren der Übertragbarkeit (notwendige Bedingungen)

Geometrie	<p>Ist das Ausgangs- und das Zielprodukt kompatibel in der Höhe/Breite/Tiefe?</p> <p>Ist das Zielprodukt kleiner, ist das Umarbeiten möglich unter Berücksichtigung des Aufwands des Umarbeitens wie das Kleinerschleifen</p>
Fertigungsverfahren	<p>Gibt es Fertigungsverfahren, die das Umarbeiten ermöglichen? Veränderte Eigenschaften können z.B. zu erhöhten Temperaturen beim Schleifen führen und Geometrie sind möglicherweise nicht erreichbar (Beispiel Knabberblechschere)</p>
Umbau/ Umgestaltung	<p>Sollte die Produktkompatibilität nicht direkt gegeben sein, stellt sich die Frage der möglichen Umgestaltung. Z.B. ist die Dicke des Blechs für das Anbringen des Griffs relevant oder kann der Fertigungsprozess angepasst werden?</p>
Demontagefähigkeit	<p>Ist die (zerstörungsfreie) Demontage der Produkte zur Freilegung der Einzelkomponenten möglich für die anschließender Verwendung?</p>
Materialeigenschaften	<p>Sind Ist ein K.O. Kriterium: Beispiel Skalpell Medizinbedarf oder Messer für Lebensmittelindustrie muss korrosionsbeständig sein aufgrund Hygiene; Beispiele: Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, thermische Ausdehnungskoeffizient (Beispiel Waffe), magnetische Eigenschaften, für legierungsabhängig; aber auch relativ: Zähigkeit, Härte, Verschleiß (Eigenschaften können allerdings teilweise verändert werden durch z.B. weitere Fertigungsverfahren), kann durch weitere Verarbeitung</p>
Produktdesign/ Komplexität	<p>Das Zielprodukt muss ein geeignetes Design vorweisen, welches Einsatz von Materialien, z.B. aus Repurposing, zulässt. Neben Materialeigenschaften einzelner Bauteile muss das Produktkonzept grundsätzlich offen für Ecodesign-Ansätze sein. Bei hochkomplexen Produkten könnte die Integration durch weitere Steigerung des Komplexitätsgrades über Repurposingansätze unter Umständen scheitern.</p>

1.6.2 Faktoren der ökologischen, ökonomischen und technischen Machbarkeit

Fertigungsverfahren	Hat Unternehmen die Möglichkeit notwendiges Fertigungsverfahren intern umzusetzen? Ist das Fertigen durch Dritte oder die Anschaffung etwaiger Maschinen sinnvoll?
Demontagefähigkeit	Zeitlicher, materieller, energetischer Aufwand Komponenten zu separieren
Ausbeute	Frage der Ökonomie und Ökologie, Verhältnis des Aufwands (Zeit, Kosten, Energie, Material) zur Anzahl gefertigter Produkte
Risiko	Versorgungssicherheit hinsichtlich planbarer Verfügbarkeiten (Menge, Zeit, Kosten, Qualität)
Aufwand Umarbeitung	Energie- und Ressourcenintensität von Fertigungsverfahren und mögliche kostenintensive Abfallströme
Rückholung	Notwendiges Wissen über Distribution und Verbleib der Produkte sowie Kundenkontakt
Produkteigenschaften	Veränderte Nutzung durch die Änderung von Materialeigenschaften ändern. Einfluss auf z.B. Nutzungsdauer und Kundenakzeptanz
Rechtliche Rahmenbedingungen	Eigentumsrechte an Materialrezepten, die in Auftragsarbeit entstanden sind, oder Vertraulichkeit von Informationen, können eine Machbarkeit blockieren.

1.6.3 Potenziale der industriellen Symbiose - IST und möglicher SOLL Zustand

Die ursprünglich geplante Analyse der regionalwirtschaftlichen Übertragbarkeit des Projektansatzes, zeigte sich also eine große methodische und empirische Herausforderung, die eine Überarbeitung der geplanten Vorgehensweise forderte. Der Sprung zwischen Nano-/Mikro- und Makro-Ebene war für den Rahmen des Projektes zu groß. Die ursprüngliche geplante Bottom-Up Analyse wurde durch eine zusätzliche Top-Down Betrachtung erweitert. Die Top-Down Analyse greift auf die etablierte Methode der regionalisierten Input-Output-Analyse unter Anwendung von Beschäftigungskoeffizienten zurück. So kann die regionale Wirtschaft anhand der Wirtschaftszweige nach Hotspots untersucht werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Verknüpfung mit Treibhausgasinventaren und die Anwendung von Einsparpotenzialen. Eine Datenerhebung bei den Projektpartnern ermöglichte eine Skalierung. Hier zeigen sich die Potenziale der industriellen Symbiose, die mit Hilfe von Materialflussanalysen in

Verbindung mit den Ergebnissen der ökologischen Analyse abgebildet werden. Im Folgenden werden IST und SOLL Zustände bzw. Potentiale dargestellt.

Bottom-Up Analyse

Materialfluss - IST 2019 – TKM

- Bezug auf Standort Remscheid mit Bezugsjahr 2019
- Die Materialeffizienz auf Meso-Ebene beträgt 20,2%
- Globale Lieferkette mit regionaler Wertschöpfung

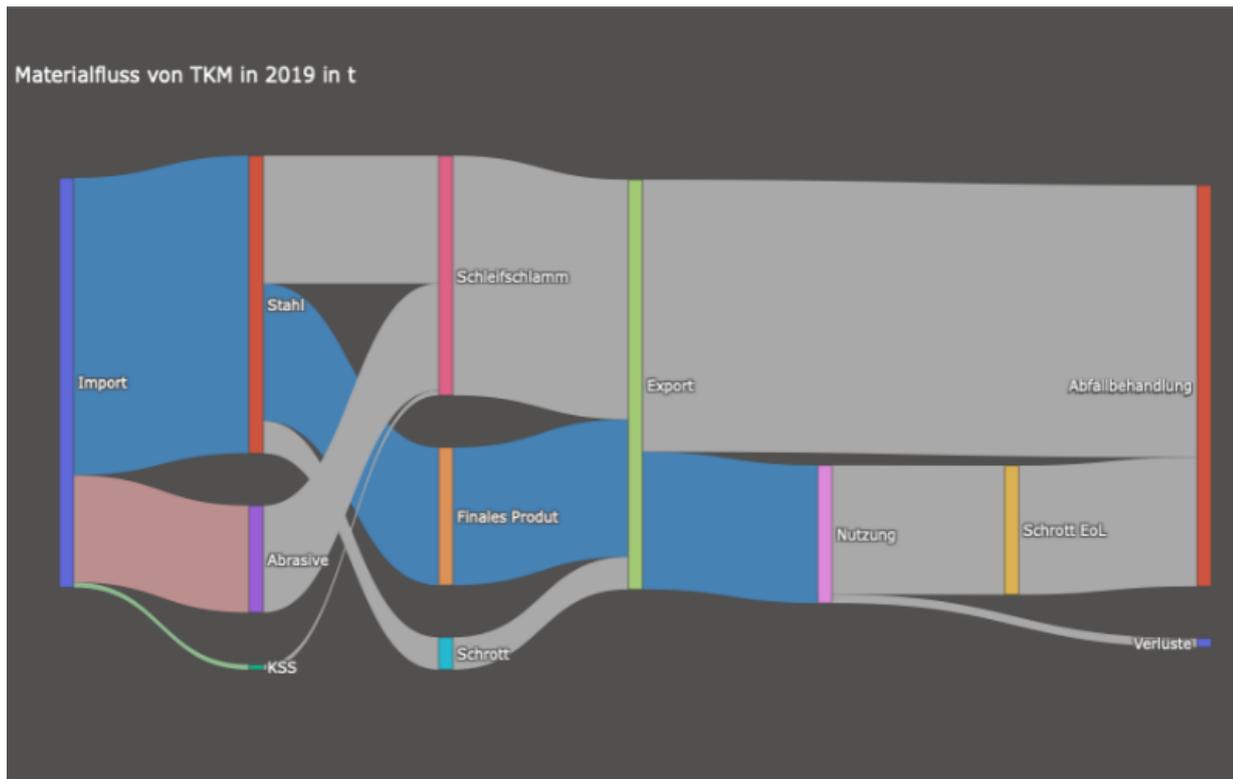


Abbildung 1-45: Materialfluss IST TKM 2019

Materialfluss - SOLL 2019 – TKM

Umsetzung Remanufacturing (maximal)

- Umsetzen von Remanufacturing
- Maximale Einsparung, da gesamte Fertigung der 800er Ronden über Sekundärmaterial läuft
- Die Materialeffizienz auf Meso-Ebene steigt um 1% auf 21,1%
- Einsparpotenzial
 - EU: 64 t CO₂ eq, 1.137 GJ eq, 778 t
 - GLO: 101 t CO₂ eq, 1.787 GJ eq, 1.244 t

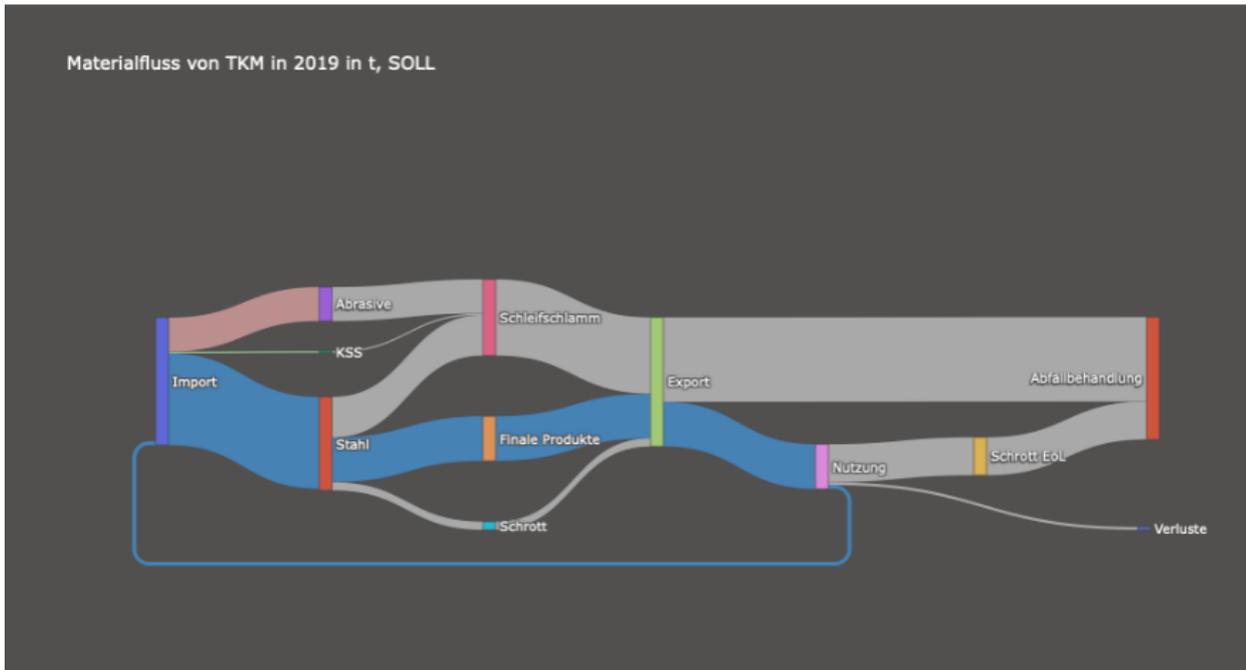


Abbildung 1-46: Materialfluss SOLL TKM 2019

Materialfluss – IST 2019 – Kirschen

- Bezug auf Standort Remscheid mit Bezugsjahr 2021.
- Die Materialeffizienz auf Meso-Ebene beträgt 62%.
- Globale Wertschöpfungskette mit regionaler Wertschöpfung.

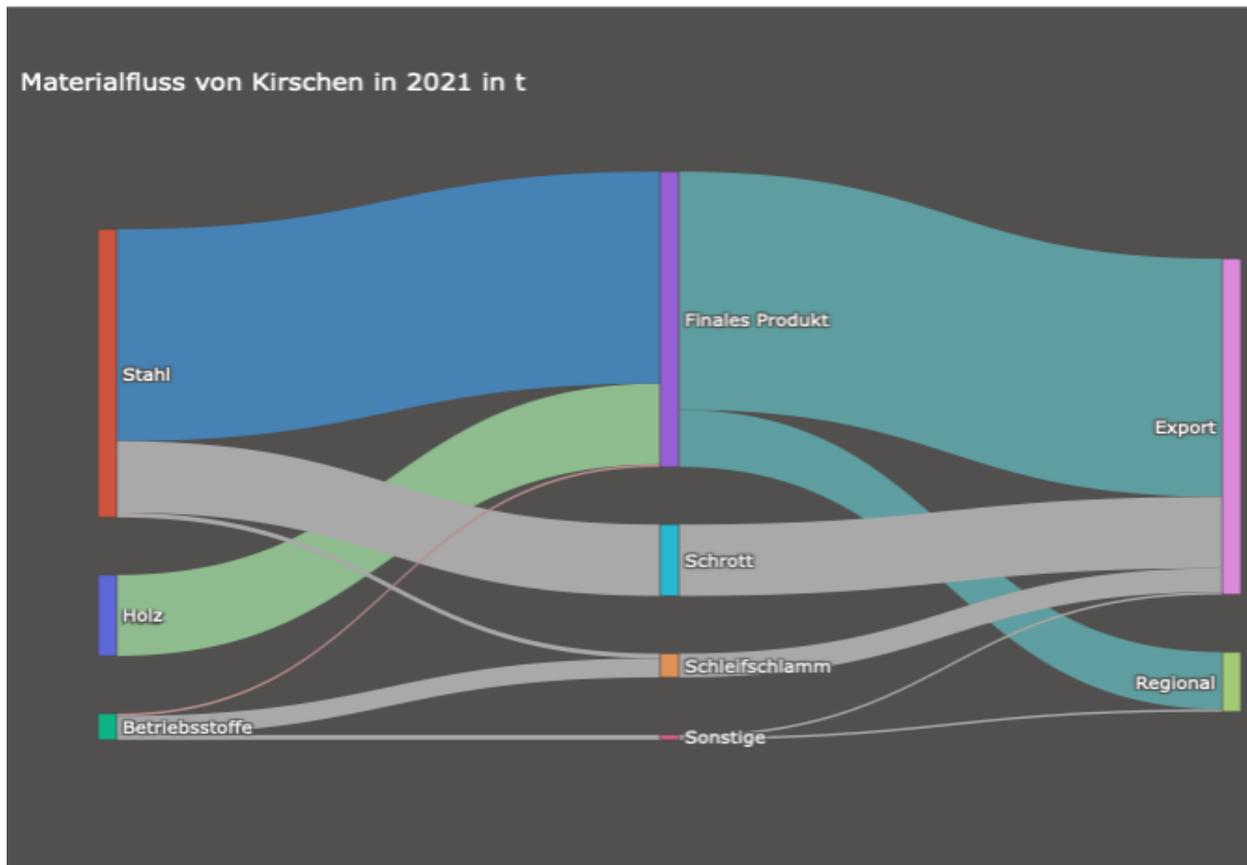


Abbildung 1-47: Materialfluss IST Kirschen 2019

SOLL – Repurposing

- Umsetzen von Repurposing auf Basis des regionalen Ausschusses.
- Fertigung von Drechselwerkzeugen erfolgt vollständig über Ausschuss.
- Die Materialeffizienz von TKM steigt um 5% auf 25%.
- Die Materialeffizienz von Kirschen bleibt unverändert bei etwa 60%.
- In pink weiteres Potenzial zur Nutzung von Ausschuss.
- Einsparpotenzial 470 t CO₂ eq, 1.982 GJ eq, 8.496 t

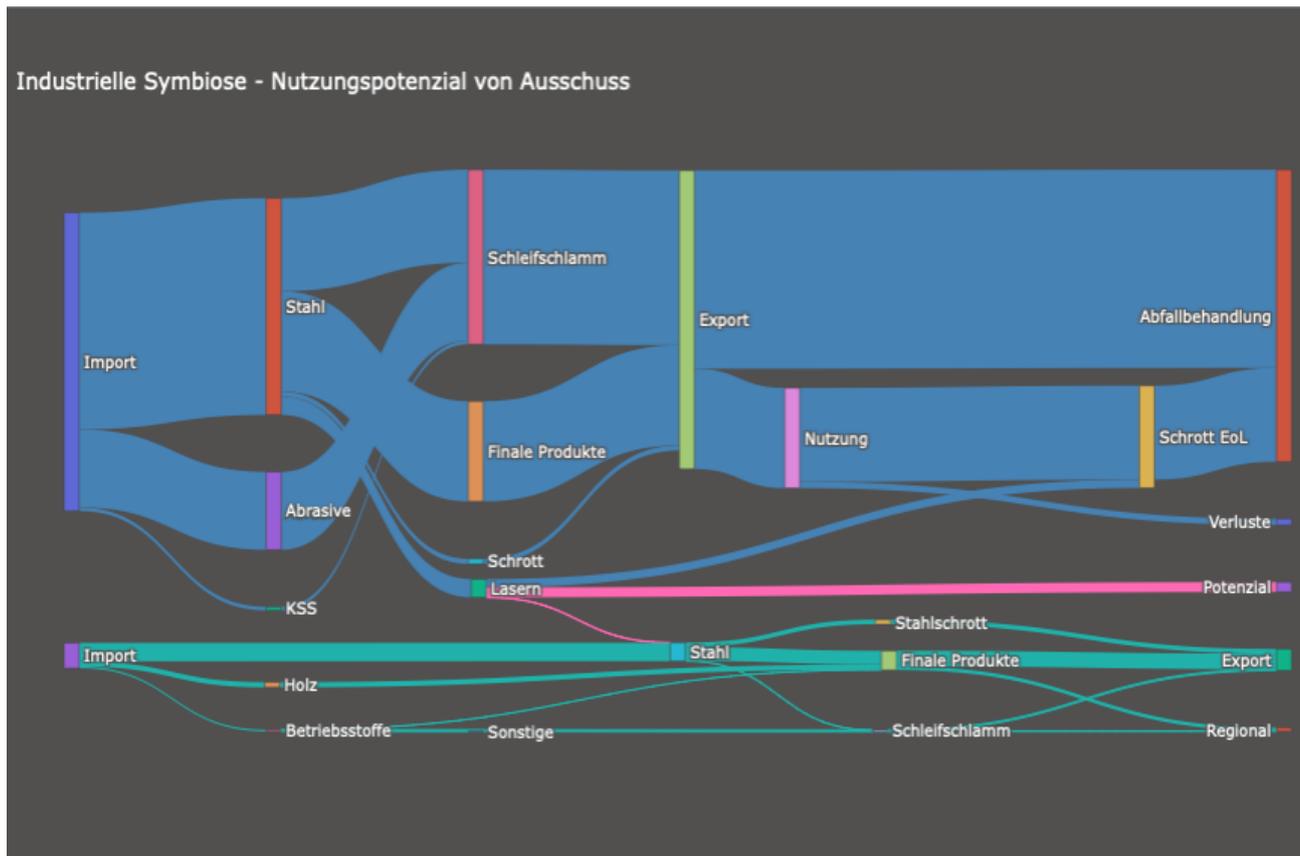


Abbildung 1-48: Materialfluss SOLL Kirschen 2019

Varianz der Ergebnisse

Ergebnisse variieren bzgl. Szenarien variieren hinsichtlich (siehe nachstehende Tabelle) der (1) der Menge des anfallenden Ausschusses, (2) Nutzbarkeit des Ausschusses, (3) Nutzung von Ausschuss für die Fertigung von Halbzeug und (4) Umfang Verarbeitung.

Wesentliche Ergebnisse:

- **Geringfügige Änderung der Materialeffizienz** auf Meso-Ebene
- Das Umsetzen von Remanufacturing ist **keine regionale** Maßnahme
- Die Nutzung von Ausschuss im Rahmen des Repurposings ist regional
- Die Umsetzung von Remanufacturing hat ein Einsparpotenzial von bis zu 101 t CO₂ eq, 1.787 GJ eq und 1.244 t.
- Die Umsetzung von Repurposing (Nutzung von Ausschuss) hat ein Einsparpotenzial von bis zu 470 t CO₂ eq, 1.982 GJ eq und 8.496 t.
- Vorteile der regionalen Nutzung von Ausschuss ist die Vermeidung des Risikos (1) des Backfirings und (2) ggf. Störung von Lieferketten.

Tabelle 1-17: Spannweite der Ergebnisse der ökologischen Einsparpotenziale

Ökologische Einsparpotenziale	Anzahl Klingen	Carbon Footprint [t CO ₂ eq]	Cumulative Energy Demand [GJ eq]	Material Footprint [t]
Produktion der 1630 mm		0,5-1,6	3,3-6,7	8,4-28,6
Produktion aller Drechselbeitel		2,4-8,2	17,3-34,8	43,7-149,1
Produktion verwandter Produkte (Min)	31.000	61,1-212,5	446,9-896	1.125,2-3.841,4
Produktion verwandter Produkte (Av)	48.000	95,3-331,5	697,2-1.398,4	1.755,5-5.993,1
Produktion verwandter Produkte (Max)	68.000	135,1-469,9	988,4-1.982,4	2.488,7-8.496,3

Top-Down – Input-Analyse

Ziel der Top-Down Analyse war die Untersuchung der regionalen Wirtschaftsstruktur hinsichtlich Produktionswert und ökologischen Hotspots für das Ansetzen von Maßnahmen der Circular Economy. Als Methode wurde eine Input-Output-Analyse mit Regionalisierung (CHARM) und ökologischer Erweiterung angewandt, wobei sich die ökologische Erweiterung auf Treibhausgasemissionen in CO₂eq bezieht. Als Datenquelle dienten: Destatis, Bundesagentur für Arbeit, Experteninterviews, Literaturrecherchen.

Im Folgenden werden einige Informationen als Überblick aus der Analyse aufgelistet.

Bruttowertschöpfung in 2019:

- National: 2.912 Mrd. €
- NRW: 646 Mrd. €
- Berg. Städtedreieck: 20 Mrd. €
- Bergisches Städtedreieck hat ein Anteil von 3% an der Bruttowertschöpfung von NRW
- Es wird als wesentliches Wirtschaftscluster für die metallverarbeitende Industrie wahrgenommen

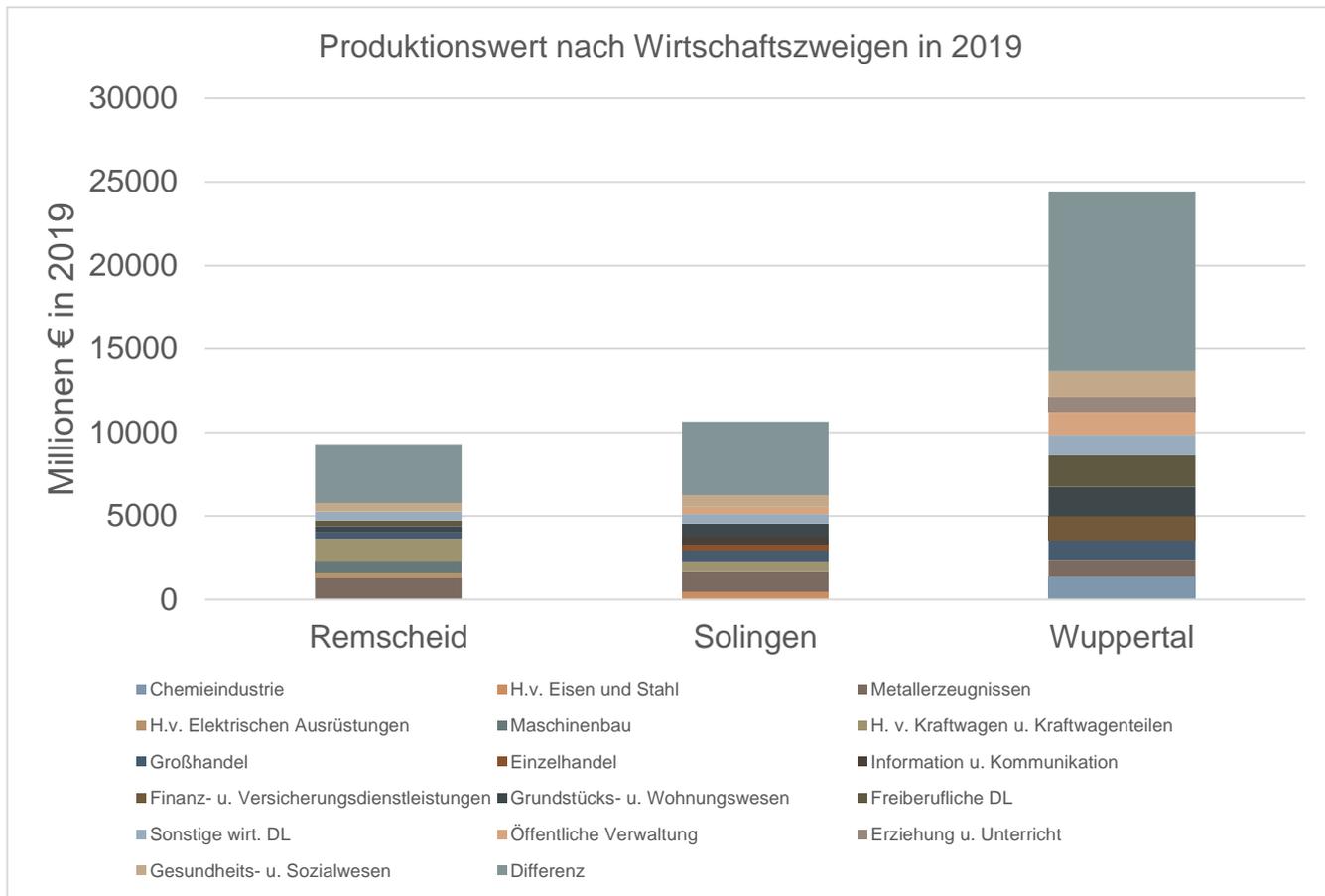


Abbildung 1-49: Vergleich des Produktionswertes von Städten des Bergischen Städtedreiecks

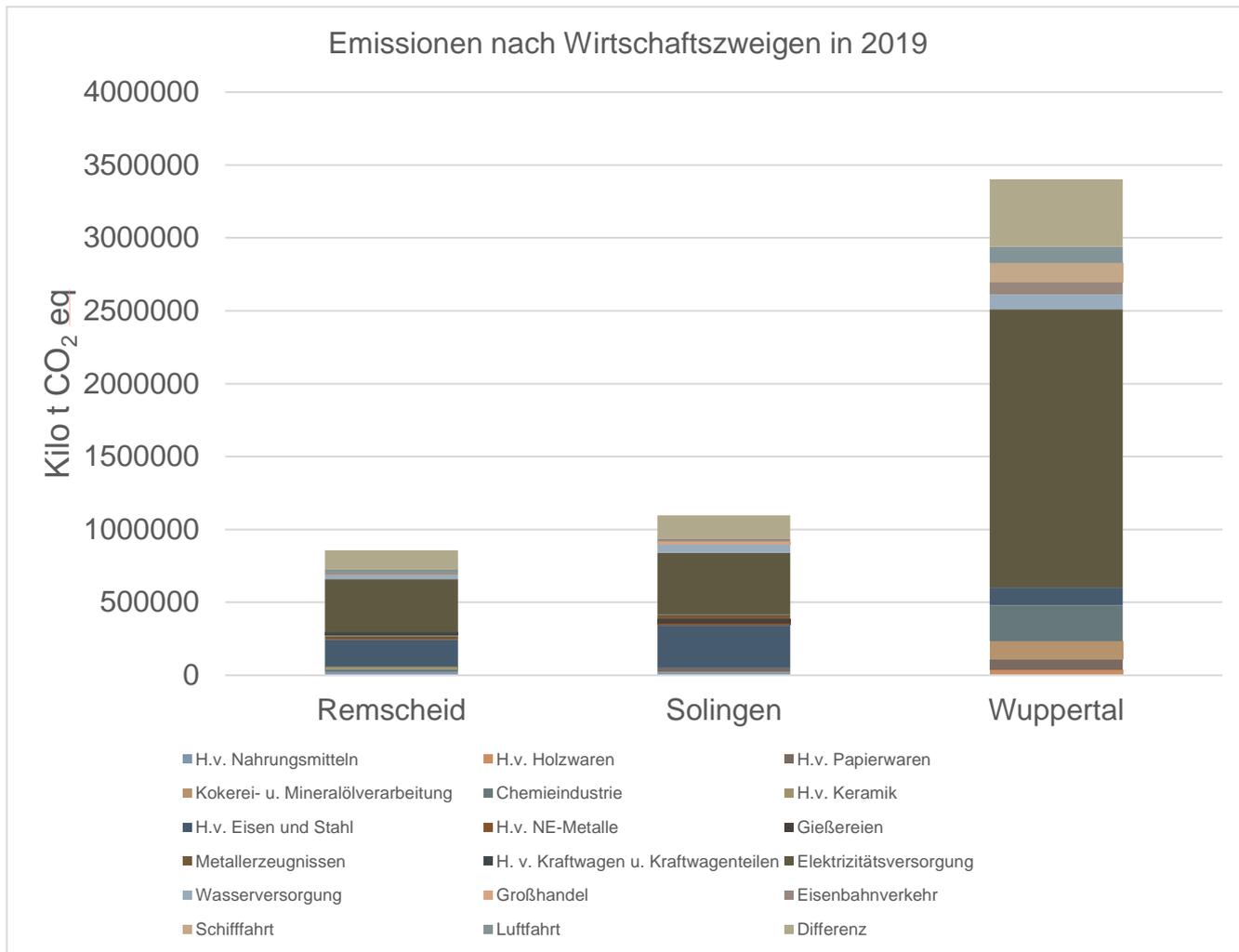


Abbildung 1-50: Vergleich der Emissionen (CO₂eq) nach Wirtschaftszweigen von Städten des Bergischen Städtedreiecks

Hauptergebnisse der Top-Down Analyse:

Sektorale Maßnahmen mit hohem ökologischen Einsparpotenzial sind:

- **Elektrizitätsversorgung:** Energieeffizienz und Erhöhung Anteil erneuerbarer Energie
- **Erzeugung Eisen und Stahl:** Erhöhung des Anteils an Sekundärrohstoff
- **Chemische Erzeugnisse:** Chemikalienleasing
- Die ökologischen Hotspots sind nur begrenzt „regional“ – Daher eher Sensibilisierungsmaßnahmen für Unternehmen die Energie und Stahlkomponenten beziehen
- Bisher nur direkte Emissionen abgebildet, sektorale Verflechtung nicht berücksichtigt
- Energie- und Ressourceneffizienzmaßnahmen sorgen für eine Beeinflussung des Sektors Elektrizitätsversorgung sowie Metallverarbeitung

1.7 Arbeitspaket 7 – Politikempfehlungen

1.7.1 Bestehende Politikinstrumente

Die politischen Entwicklungen auf globaler, europäischer und deutscher Ebene zeigen deutlich, dass die Relevanz der Kreislaufwirtschaft als Beitrag zur Erreichung der Klimaziele anerkannt wird. Dabei ist eine Vielzahl an politischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, die auf unterschiedlichsten Ebenen wirken. Angefangen auf globaler Ebene bei den Sustainable Development Goals (SDGs), die mittelbar und unmittelbar den Ressourcenverbrauch adressieren und somit auch die Ziele der Kreislaufwirtschaft in den Fokus globaler Entwicklung rückt (Bahn-Walkowiak & Wilts, 2020).

Die globalen politischen Rahmenwerke spiegeln sich dann auf europäischer Ebene wider, z.B. Circular Economy Action Plan im Rahmen des European Green Deals, und auf deutscher Ebene, z.B. Kreislaufwirtschaftsgesetz sowie das Ressourceneffizienzprogramm. Um die Gestaltungskraft der politischen Instrumente für eine Hebung der Kreislaufwirtschaft zu analysieren, wurde eine erste Literaturanalyse durchgeführt. Dabei wurden u.a. die ersten Ergebnisse aus den Transferworkshop (AP 8) genutzt. Hier benannten die teilnehmenden Personen Chancen und Barrieren bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene. Die zu untersuchenden politischen Instrumente sollen eben diese Barrieren adressieren, herabsetzen und so den Transfer und die Verbreitung der Kreislaufwirtschaft fördern. Die Untersuchungen hierzu haben begonnen.

Aus der Untersuchung der Rechtmäßigkeit ist ein weiteres relevantes politisches Instrument hervorgegangen. Zur Förderung der CE trotz der enormen Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes besteht die Möglichkeit sogenannter **„Regulatory Sandboxes“** – ein regulatorischer Rahmen insbesondere für innovative Unternehmen, um dessen Entwicklung zum vollregulierten Markt zu ermöglichen. Es ermöglicht das unternehmerische Experimentieren und das Ausprobieren im wesentlich freieren aber dennoch rechtlich definierten Rahmen. Solche Experimentierräume ermöglichen auch das evidenzbasierte Entwickeln des Rechtsrahmens. Zur Umsetzung solcher Reallabore braucht es Flexibilisierungsinstrumente wie die sogenannten „Experimentierklauseln“.

Die politischen Entwicklungen auf europäischer und deutscher Ebene zeigen deutlich, dass die Relevanz der Kreislaufwirtschaft als Beitrag zur Erreichung der Klimaziele anerkannt wird. Als maßgebliche politische Richtschnur ist auf europäischer Ebene der Circular Economy Action Plan im Rahmen des European Green Deals zu nennen und auf deutscher Ebene das Kreislaufwirtschaftsgesetz, sowie das Ressourceneffizienzprogramm. Um die Gestaltungskraft der politischen Rahmungen zu mehr Kreislaufwirtschaft zu analysieren, wurde eine erste Literaturanalyse durchgeführt. Im Folgenden werden einige zentrale Ergebnisse zusammengefasst:

Globale Ebene:

Die Sustainable Development Goals (SDGs) beinhalten die maßgeblichen politischen Ziele auf globaler Ebene. Viele der SDGs adressieren mittelbar oder unmittelbar den Ressourcenverbrauch (siehe Grafik) und stellen somit erstmals Kreislaufwirtschaftsziele in den Fokus globaler Entwicklung. (Bahn-Walkowiak & Wilts, 2020)

Europäische Ebene:

Die Gesetzgebungen auf europäischer Ebene ebnen den Weg zur Kreislaufwirtschaft. Bisher geht es in vielen politischen Programmen jedoch vor allem um die Optimierung von Kreisläufen, sprich die Verwertung von Abfällen oder die Abfallvermeidung, weniger jedoch um die Wiederverwendung und die Schließung der Kreisläufe (vgl. UBA 2021a:30). Die Weiterentwicklung der Ökodesign-Richtlinie in Bezug die Aspekte der Reparierbarkeit und Langlebigkeit wird positiv bewertet, jedoch trifft dies bisher zu wenige Produktgruppen, um einen wirklichen Hebeleffekt zu generieren (vgl. ebd.). Das neue Verpackungsgesetz soll recyclingfreundlichere Verpackungen fördern, nach Analyse des UBAs greifen die finanziellen Anreize jedoch zu kurz und somit besteht die Gefahr, dass die Kosten an die Konsument*innen durchgereicht werden. Insgesamt ist zu beobachten, dass bisher zentrale Elemente fehlen, um die Kreisläufe, z.B. durch den Einsatz von Sekundärmaterial, zu schließen (vgl. UBA 2021a:31).

Deutsche Ebene:

Auch auf deutscher Ebene zeigt die Analyse, dass die bisherigen politischen Programme zwar in die richtige Richtung navigieren, insgesamt aber zu kurz greifen, um eine umfassende Transformation voranzutreiben (vgl. UBA 2021a:5). Auf Bundesebene sollte daher ein Nationales Zielsystem mit klar verteilten Zuständigkeiten und klar definierten, messbaren und terminierten Zielen etabliert werden (vgl. WWF & WI 2021:15f.; MWIDE 2021:79), sodass eine gemeinsame Vision entsteht, deren Umsetzung überprüft werden kann. Zudem zeigt die Evaluation der politischen Maßnahmen des Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes), dass dieses um marktbasierende Instrumente, inklusive finanzieller Anreize und Steuern, erweitert werden sollte. Die Strategie der ersten Phase, vor allem informationsbasierte Instrumente und Innovationsförderungen einzusetzen, wurde vom Markt nicht ausreichend aufgegriffen (vgl. UBA 2021b:1f.) und daher werden nun neue Ansätze empfohlen, die im weiteren Verlauf noch diskutiert werden. Die allgemeine Empfehlung des UBAs lautet jedoch den Sekundärrohstoffeinsatz in Produkten zu erhöhen, ein Produktdesign zu fördern, welches reparatur- und recyclingfreundlich ist und Geschäftsmodellinnovationen zu unterstützen, welche auf zirkuläre Strategien setzen (vgl. UBA 2021a: 37ff.). Zudem sollten klimaschädliche Subventionen abgebaut (vgl. Bahn-Walkowiak, Wilts 2020:29) und Ziele und Indikatoren harmonisiert werden (vgl. ebd.:32), sodass die Kreislaufwirtschaft mit einer klaren Strategie gefördert wird.

Im Folgenden werden die bestehenden und empfohlenen Politikinstrumente zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft diskutiert.

1.7.2 Steuerungsmöglichkeiten und Anreizsysteme

Politikinstrument 1: Förderprogramme

Beschreibung: Die öffentliche Verwaltung beschreibt in Förderprogrammen die Regeln, um Fördergelder für bestimmte Zwecke vergeben zu können (vgl. Franchise Portal 2021). Es gibt zahlreiche Förderprogramme von der EU, Bundes-, sowie Landesministerien oder Institutionen wie der KfW zum Thema Kreislaufwirtschaft. Die Förderhöhe, der Förderungszeitraum, sowie die Zielsetzung unterscheiden sich dabei stark. Oftmals steht die Stärkung der Wettbewerbsvorteile im Vordergrund und es werden verstärkt KMUs gefördert. Die Analyse aktueller Förderprogramme in Deutschland (Stand Dez. 2021) zeigt, dass die förderfähigen Maßnahmen im Bereich Circular Economy derzeit vor allem Investitionen für Innovationen, F&E, Beratung, der Einsatz von Rezyklaten, Maßnahmen zur Intensivierung der Produktnutzung und die Förderung von Remanufacturing beinhalten.

Umsetzungsstatus: wird aktuell umgesetzt, jedoch unterscheiden sich die Volumina der Fördersummen stark.

Im Anhang befindet sich eine tabellarische Übersicht über aktuell laufende Förderprogramme, die unter dem Stichwort: Kreislaufwirtschaft und Circular Economy in der Förderdatenbank zu finden waren.

Politikinstrument 1 a): Klimaschutzverträge

Beschreibung: Klimaschutzverträge sind eine spezifische Form staatlicher Förderprogramme. Der Staat schließt mit Unternehmen projektbezogene Klimaschutzverträge ab, um den Umbau zu einer klimafreundlichen Produktion zu erleichtern und um den Aufbau grüner Leitmärkte zu fördern. Diese Instrumente (Contracts for Difference) kommen ursprünglich aus der Finanzbranchen und dienen dazu, volatile Preise auszugleichen. Im Falle der Stahlindustrie schwanken die Preise für die Emissionszertifikate. Hohe Investitionen in CO₂ arme Produktionsweisen mit darauf folgenden höheren Betriebskosten sind für privatwirtschaftliche Unternehmen nur bei hohen Preisen für die Emissionszertifikate lukrativ. Um den Umbau trotzdem voranzutreiben soll den Unternehmen durch die Klimaschutzverträge ein Betriebskostenzuschlag angeboten werden, da die höheren Betriebskosten bisher durch keine Förderprogramme adressiert werden. Im Falle der Carbon Contracts for Difference wird dem Unternehmen ein Vertragspreis (strike price) vom Staat garantiert. Dieser kann z.B. die Differenz zwischen dem aktuellen Preis der Emissionszertifikate und den höheren Betriebskosten abbilden. Unterschreitet der Marktpreis diesen strike price, schließt der Staat diese Lücke und zahlt die Differenz an das Unternehmen. Überschreitet der Marktpreis den strike price zahlt das Unternehmen die Differenz an den Staat zurück. Dadurch ergibt sich eine Planungssicherheit für beide Seiten. (vgl. BMWi 2020; Agora Energiewende et al. 2021)

Umsetzungsstatus: Die Carbon Contracts for Difference werden im deutschen Koalitionsvertrag 2021 und von deutschen Forschungsinstitutionen als geeignetes Instrument benannt, um die deutsche Grundstoffindustrie zu unterstützen (vgl. Koalitionsvertrag 2021:25; Agora Energiewende et al. 2021:5). Zudem sind im Rahmen des deutschen Handlungskonzeptes Stahl bereits Pilotprojekte in Höhe von 550 Millionen Euro ab 2022 bewilligt (vgl. BMWi 2021:2). Im Eckpunkte Papier zur Ausgestaltung der Förderrichtlinie von April 2021 werden die Betriebskostendifferenzen adressiert, da diese bisher nicht gefördert werden (vgl. BMU 2021:3). Die Investitionskostendifferenzen werden bereits durch andere Förderprogramme abgedeckt. Trotzdem wird längerfristig auf eine Erweiterung der Investitionskostendifferenzen plädiert (vgl. ebd.). Die indirekten Folgen für die stahlverarbeitenden Unternehmen sind bisher noch nicht umfassend abschätzbar.

Politikinstrument 2: Steuerung- und Monitoringsystem

Beschreibung: Die Etablierung eines nationalen Steuerung- und Monitoringsystems in Form eines nationalen Aktionsplans wird von WWF und Wuppertal Institut empfohlen, um eine klare Vision zu schaffen. Damit können allen Beteiligten klare Verantwortlichkeiten, sowie Aufgaben zugewiesen werden. Die Definition verbindlicher Ziele und Prioritäten ist notwendig, damit ein zentrales Steuerungs- und Monitoringsystem aufgebaut werden kann, aufgrund dessen die Überprüfbarkeit und Messbarkeit der Ziele gewährleistet wird.(vgl. WWF & WI 2021). Diese Ziele sollten auf einem passenden und harmonisierten Indikatorenset aufbauen, welches die relevanten Größen für eine Kreislaufwirtschaft misst (vgl. UBA 2019:14).

Umsetzungsstatus: Die Entwicklung eines nationalen Aktionsplans ist eine Empfehlung. Bisher gibt es das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm, welches das Ziel der Entkopplung des Ressourcenverbrauchs vom Wirtschaftswachstum seit 2012 verfolgt. Dabei wird alle 4 Jahre über die Entwicklung berichtet. Momentan befindet sich das Programm in der dritten Umsetzungsphase (ProgRess III, BMUV, 2020).

Ein passendes Indikatorenset wird aktuell erarbeitet und diskutiert. Auf europäischer Ebene gibt es neue Indikatoren, wie die "Verwendungsrate von recyceltem Altmaterial (EOL-RIR) für Rohstoffe", für die bisher jedoch das Monitoringsystem fehlt und somit keine Daten verfügbar sind. Auf deutscher Ebene werden momentan vor allem die Indikatoren Gesamtrohstoffproduktivität, (vgl. UBA 2020; vgl. Bahn-Walkowiak, Wilts 2020:28); der Direct Effect of Recovery (DERec) und die Direct and Indirect Effects of Recovery (DIERec) genutzt. Die beiden letztgenannten messen den Beitrag "von Sekundärrohstoffen zur Substitution von Primärrohstoffen" (UBA 2021a:11). Empfohlen wird deren Ausweitung auf die Produktebene, auch im Rahmen der neuen Normungsreihe 4555x (vgl. UBA 2019:6). Empfehlungen zu passenden Indikatorenssystemen sind vorhanden, doch die Herausforderung liegt in der Schaffung der Datenverfügbarkeit (vgl. Prognos 2020:186).

Politikinstrument 3: Besteuerung von Ressourcen

Beschreibung: Die Grundidee Ressourcen zu besteuern, liegt darin, die Attraktivität der Primärrohstoffe zu senken und die Nutzung von Sekundärrohstoffen zu fördern. Die momentane Herausforderung liegt darin, dass Primärrohstoffe oft günstiger und leichter verfügbar sind, als Sekundärrohstoffe und dass Sekundärrohstoffe oft mit dem Vorurteil belastet sind, weniger gute Qualität zu bieten. Dieser kulturelle Aspekt zeigt auf, dass ökonomische und regulative Instrumente als Begleitmaßnahmen notwendig sind, um das Ziel eines erhöhten Sekundärrohstoffeinsatzes zu erreichen. Diskutiert werden derzeit unterschiedliche Ressourcensteuern. Die zentrale Frage bei der Ausgestaltung der Ressourcensteuer ist an welchem Punkt in der Produktionskette die Steuer erhoben wird. Es gibt verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten (vgl. DNR 2018:1f.). Die Steuer kann nach der Extraktion der Rohmaterialien, im ersten industriellen Produktionsschritt oder auf den Konsum erhoben werden (vgl. Milios 2021). Je früher die Steuer in der Produktionskette erhoben wird, desto weniger Aufwand ist damit verbunden (vgl. ebd.). Gleichzeitig ist zu bedenken, dass ressourcenreiche Länder eine solche Ressourcensteuer direkt nach der Extraktion aufgrund zu befürchtender Wettbewerbsnachteile möglicherweise nicht einführen wollen. Die Ausgestaltung der Steuersätze wird umso herausfordernder, sobald global unterschiedliche Ressourcensteuern erhoben werden, da eine doppelte Besteuerung zu vermeiden ist. Weitere Differenzierungsmerkmale der Ressourcensteuern sind: Preis- oder Mengensteuer, die Steuerhöhe, der Grenzausgleich, die Mittelverwendung, etc. (vgl. ebd.).

Diskutiert werden derzeit die folgenden 3 Ressourcensteuern:

- Die **Primärrohstoffsteuer** soll Primärrohstoffe z.B. im Bereich Baustoffe und Metalle besteuern und eine Sekundärrohstoffeinsatzquote soll diesen Prozess flankieren. Die Gefahr einer solchen Steuer liegt darin, dass daraufhin vermehrt Fertigprodukte eingeführt werden könnten, um sich die Steuer zu sparen (vgl. WWF & WI 2021:25). Dies würde der deutschen Wertschöpfung schaden.
- Daher wird auf europäischer Ebene eine **Produktressourcensteuer** diskutiert, um diesem Problem Abhilfe zu schaffen. Mit dieser Steuer sollen die relevanten (größte Vorkommnisse, CO2 Intensität, etc.) Primärrohstoffe, die in dem Produkt enthalten sind, besteuert werden. Auf verwendete Sekundärrohstoffe würde dann keine Steuer behoben

werden. Um diese Klassifizierung der Sekundärrohstoffe jedoch zu ermöglichen, bräuchte es auch außerhalb Europas einheitliche Zertifizierungen von recycelten Materialien. Dabei wird auf die Rolle von Branchenverbände, wie dem Responsible Steel Standard verwiesen. (vgl. UBA 2021 policy paper:7).

- Realistisch wird in Deutschland vor allem die **Primärbaustoffsteuer** diskutiert. Diese bezieht sich zwar nur auf die Bauindustrie, das heißt, die primären Gesteinskörnungen wie Kies, Sand und Naturstein sollen mit einer Mengensteuer besteuert werden. Der Vorteil dieser Steuer ist, dass sie sich nur auf wenige Stoffströme bezieht, die nur selten grenzübergreifend gehandelt werden und dementsprechend einen geringeren bürokratischen und rechtlichen Aufwand mit sich bringen würde. Daher wird die Primärbaustoffsteuer als realistischen Einstieg in den Bereich der Ressourcensteuern gehandhabt.(vgl. UBA 2021 policy paper:3)

Umsetzung: In Deutschland wird derzeit die Besteuerung von Kies und Sand im Rahmen der Primärbaustoffsteuer diskutiert, da dies einige der wenigen in Deutschland vorkommenden Rohstoffe sind. In Ländern, wie Großbritannien werden sie bereits erfolgreich angewendet, wie nachfolgende Grafik zeigt. Die Herausforderung liegt bei der Einführung einer Steuer darin, die unerwünschten Nebenfolgen vorherzusehen und abzuwenden oder mit anderen Instrumenten abzumildern.

Politikinstrument 4: Steuervorteile für Wiederverwendung oder Verwendung von Abfällen

Beschreibung: Auf europäischer Ebene wurde im Dezember 2021 die Mehrwertsteuersystemrichtlinie neu überarbeitet (vgl. Europäische Kommission 2021) Künftig können Dienstleistungen, die dem Umweltschutz dienen mit einem niedrigeren Mehrwertsteuersatz belegt werden. Ein Beispiel des Umweltbundesamtes ist die die Weiterentwicklung des Blauen Engels, um kontinuierlich Best in Class Produkte auszuzeichnen, die dann man einem reduzierten MwSt-Satz besteuert werden können. (UBA 2017:3). Milios 2021 empfiehlt eine Circular Economy Steuer Taxonomie - das heißt eine umfassende Steuerreform, die den gesamten Produktlebenszyklus umfasst. Von den Rohmaterialien bis hin zum Lebensende und dem Abfallmanagement. Dazu zählen 3 Steuern: 1) Primärrohstoffsteuer (siehe oben), 2) Steuerreduzierung für Reparatur und Reuse, 3) Angepasste Steuersätze entsprechend der Abfallhierarchie.

Umsetzung Senkung der MwSt für Reparaturdienstleistungen: In Schweden wurde die Mehrwertsteuer auf Reparaturdienstleistungen bereits im Jahr 2017 gesenkt. Eine Studie zeigt jedoch auf, dass die erwünschten Ergebnisse (erhöhter Nutzungsgrad von Reparaturdienstleistungen aufgrund der niedrigeren MwSt) in Schweden nicht nachweisbar eingetreten sind. Als hauptsächliche Barrieren wurden die folgenden vier Gründe genannt: 1) Fehlendes Wissen über reduzierte MwSt. 2) Neue Produkte sind oftmals günstiger als die Reparatur, trotz gesenkter MwSt. 3) Weniger gute Produktqualität und 4) Reparaturunfreundliches Produktdesign. Daher wird die alleinige Wirkungskraft dieses Instrumentes von Milios angezweifelt (vgl. Milios. 2021:488 ff.).

Eine österreichische Studie empfiehlt die Mehrwertsteuersenkung neben der Reparatur auch auf Ersatzteile, da diese im Schnitt 40% der Kosten ausmachen, und somit ein größerer Preiseffekt eintreten würde (vgl. Oberpriller et al.2019:51). Eine sorgfältige Ausgestaltung dieses Instrumentes ist notwendig, damit diese Mehrwertsteuersenkung nicht auch für Neuprodukte (aus)genutzt werden kann. Die

volkswirtschaftliche Effizienz der Maßnahme der MwSt- Senkung wird insgesamt als “mittel” eingestuft (vgl. ebd.).

Umsetzung auf die Abfallhierarchie angepasster Steuersätze: Die EU-Abfallhierarchie lautet mit abnehmender Priorität: a) Vermeidung, b) Vorbereitung zur Wiederverwendung, c) Recycling, d) energetische Verwertung, e) Beseitigung. Die Steuersätze sollten laut Milios nur auf die Optionen c, d und e erhoben werden, sodass die Vermeidung und Wiederverwendung die bestmöglichen Optionen sind (vgl. Milios 2021:482). In Schweden wurden Steuern auf die Beseitigung von Abfall auf Mülldeponien erlassen, sowie auf die energetische Verwertung. Daraus resultierte jedoch keine verringerte energetische Verwertung, sondern steigende Müllgebühren und Energiepreise für Kommunen (vgl. ebd.). Modellrechnungen zeigen jedoch ein positives Potential für Schweden, sodass die Steuern auf Abfallströme Recycling und Reuse stärken könnten (vgl. ebd: 491).

Auf Grund dieser benannten unerwünschten Effekte einzelner Maßnahmen bedarf es gut zugeschnittener, aufeinander abgestimmte und ganzheitliche Politikinstrumente, um das Ziel der Kreislaufwirtschaft bestmöglich zu erreichen (vgl. Milios 2021:492). Dafür schlägt Milios die CE Steuer Taxonomie, die Rohstoffe und Entsorgung verteuert, sodass der Lebenszyklus verlängert und die Wiederverwendung attraktiver wird. Zudem sollten Steuerinstrumente von institutionellen Maßnahmen begleitet werden - beispielsweise die Rückverteilung der Steuereinnahmen zu Branchen, die durch die Kreislaufwirtschaft vor finanziellen Herausforderungen stehen (vgl. Milios 2021: 494).

Politikinstrument 5: digitaler Produktpass

Beschreibung: Ein standardisierter, digitaler Produktpass soll der “digitale Zwilling” realer Produkte, Dienstleistungen und Lebensmittel werden und alle relevanten Umwelt- und Materialdaten beinhalten. Dies soll das verpflichtende Reporting für Unternehmen erleichtern, Transparenz für Abnehmende schaffen und nachhaltigen Konsummuster erleichtern, indem Reparatur, Recycling und fachgerechte Entsorgung gewährleistet werden können. (vgl. BMU o.J.)

Umsetzung: Auf deutscher Ebene wird im Rahmen der umweltpolitischen Digitalisierungsagenda die Einführung des digitalen Produktpasses geplant und auf europäischer Ebene wird dies durch den European Green Deal empfohlen(vgl. BMU o.J.).

Geplant wird derzeit für 2022 die Einführung eines Produktpasses für Batterien in Elektrofahrzeugen (vgl. 320° 2021). Insgesamt soll der Schwerpunkt zu Beginn auf ressourcen- und energieintensive Produkte gelegt werden (vgl. ebd.).

Die wesentlichen Ergebnisse der SWOT-Analyse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 1-18: SWOT-Analyse

Förderprogramme	Vergabe von Fördergeldern für einen bestimmten Zweck; oftmals Förderung von KMUs und F&E	<ul style="list-style-type: none"> (+) Förderung Vernetzung und Innovationsfähigkeit (+) Erste Impulse und Herabsetzen von Barrieren (+) Beratung und Zusammenarbeit zwischen Partner*innen (-) bürokratischer Aufwand (-) geringe Investitionssummen (-) Reifegrad vs. Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit
Steuerung- und Monitoringsysteme	Definition von Zielen, Prioritäten und Verantwortlichkeiten, die durch das stete Prüfen von Indikatoren nachgehalten werden	<ul style="list-style-type: none"> (+) Planungssicherheit und Wirksamkeit (+) Aufzeigen von Entwicklungspfaden (+) Priorisierung und Druck (-) Übersetzung der Ziele (Meso-Makro) (-) Generische Ziele (Branchen?) (-) Daten zum Monitoren
Ressourcensteuer	<p>Besteuerung von Primärrohstoffen, um die Attraktivität von Sekundärrohstoffen zu erhöhen;</p> <p>(1) Primärrohstoffsteuer, (2) Produktressourcensteuer, (3) Primärbaustoffsteuer</p>	<ul style="list-style-type: none"> (+) Ökonomische Anreize (+) Einpreisung der Ressourceneffizienz (+) Einfluss auf Kaufverhalten (-) globaler Wettbewerbsnachteil (-) aufwändige Nachweispflicht (-) Knappe Verfügbarkeit mit möglichen ökon. Folgen (-) rechtliche Unsicherheit bei neuartigen Steuern
Steuervorteile bei Wiederverwendung	Das Mehrwertsteuersystem erlaubt in der EU seit 2021 einen niedrigeren Steuersatz für Dienstleistungen, die dem Umweltschutz dienen; z.B. Reparatur oder entlang CE-Hierarchie	<ul style="list-style-type: none"> (+) finanzielle Anreize für Unternehmen (+) interne Auseinandersetzung mit Ressourcen (+) Einpreisung Ressourceneffizienz (-) Unsicherheit bei neuartigen Steuern (-) unklare Rückführung bei unbekanntem Kund*innen (-) Rechtliche Unsicherheit
Digitaler Produktpass	Ein digitaler Zwilling, der alle relevanten Umwelt- und Materialdaten enthält;	<ul style="list-style-type: none"> (+) Einheitliche Infos und Transparenz (+) Geringerer Kommunikationsaufwand (+) Sammlung neuartiger Informationen (-) Sensibilität von Daten (-) Bürokratischer Aufwand

		(-) Benachteiligung KMUs? (-) ökon. und ökol. Aufwand der Systemeinführung
--	--	---

Unter Berücksichtigung der Herausforderungen, die in dem Workshop von CoT das Ergebnis waren, lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

Regional Herausforderungen (Workshops)	Politische Instrumente
Kapitalintensive Investitionen und höhere Betriebskosten für umweltfreundlichere Produktion	Förderprogramme wie Klimaschutzverträge, die bei Umstellung ökonomisch unterstützen
Fehlendes Fachwissen, internes Know-how und personeller Aufwand für F&E	Förderprogramme im Sinne von Beratungsangebot: Vernetzung lokaler Akteure, Umsetzung von Projekten und Wissensaufbau wie runde Tische und Plattform (InSym)
Fehlendes Wissen und Unklarheit bzgl. Qualitäten und Anforderungen	Schaffung von Klarheit durch Rechtssicherheit und Standards; "Sandboxes" zum Testen von rechtlichen Rahmenbedingungen und Entwicklung von Zertifizierungssystemen
Change Management – Sinnvermittlung schwierig, fehlende Bereitschaft zur Veränderung	Aufbau eines klaren Zielsystems und Anforderungen an einzelne Akteure schafft Verbindlichkeit und Klarheit

1.8 Arbeitspaket 8 – Transfer

Datum	Formattitel	Titel	Beitrag	Referent*in
2019	World Resource Forum	Measuring the Environmental Impact of the Circular Economy Concepts using the Example of Steel Tools	Poster	W. Hagedorn (WI) (Hagedorn et al., 2019)
2019	Regionaler Workshop des EU-Projekts CycleSME	CoT - Entwicklung und Erprobung geschlossener CE-Konzepte für die metallverarbeitende Werkzeug- und Schneidwarenindustrie	Vortrag	Dr. K. Greiff (WI)
2020	Müll & Abfall	Zirkuläres Wirtschaften auf Produktebene	Artikel	W. Hagedorn (WI) (Hagedorn, Kick, et al., 2020)
2020	Life Cycle Innovation Conference	The Environmental Impact of Steel Tools designed for Repurposing	Vortrag	W. Hagedorn (WI)

				(Hagedorn, Greiff, et al., 2020)
2021	Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik	Remanufacturing - Die neue Art der Produktion Der Weg zu einer Kreislaufwirtschaft (ISSN: 2191-1347)	Artikel	L. Wieczorek (BUW) P. Kronenberg (BUW)
2021	YRSSMR – Intermezzo	Circle of Tools - The Implementation of the Circular Economy Concept Repurposing	Vortrag	W. Hagedorn (WI)
2021	Ecobalance	Circular Economy Strategies in Practice: Ecological Potentials of Linking Value Chains in the Metalworking Industry	Vortrag	W. Hagedorn (WI) (Hagedorn et al., 2021)
2021	Life Cycle Management Conference	Industrial Symbiosis – When disposed Machining Knife become Raw Material	Vortrag	W. Hagedorn (WI)
2021	Ressourceneffizienz Plattform Augsburg	Circle of Tools	Vortrag	W. Hagedorn (WI)
2021	WDR – Lokalzeit Bergisches Land	Circle of Tools	TV- Beitrag	W. Hagedorn (WI)
2021	Effizienz Agentur NRW	CoT - Entwicklung und Erprobung geschlossener CE-Konzepte für die metallverarbeitende Werkzeug- und Schneidwarenindustrie	Vortrag	T. Kästner (TKM)
2021	Industriekolloquium	CoT - Entwicklung und Erprobung geschlossener CE-Konzepte für die metallverarbeitende Werkzeug- und Schneidwarenindustrie	Vortrag	A. Röttger (BUW)
2022	Praktische Metallographie	Quantification of methods used in field metallography using the example of quality assurance measures for a circular economy for high-alloy steels	Artikel	L. Wieczorek (BUW) P. Kronenberg (BUW) A. Röttger (BUW) S. Weber (RUB)
2022	ISIE SEM	Circular Design of Steel Products	Vortrag	W. Hagedorn (WI)
2022	TrashTalk	Steel – Circularity at its best?	Video	W. Hagedorn (WI)
2022	Journal of Cleaner Production	More than recycling – The potential of the Circular Economy shown by a case study of the metal working industry	Artikel	W. Hagedorn (WI) A. Röttger (BUW) L. Wieczorek (BUW) (Hagedorn, Jäger, et al., 2022)
2022	Sustainable Materials & Technology	Alloy and process design of forging steels for better environmental performance	Artikel	W. Hagedorn (WI) (Hagedorn, Gramlich, et al., 2022)

2022	IHK bergische Wirtschaft	Nachhaltige Wirtschaft - Nichts nicht verwerten	Interview	H.-D. Sanker (Freund & Cie) Th. Becher (Kirschen) Th. Kästner (TKM)
2022	ReziProk Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe	CIRCLE OF TOOLS Entwicklung und Erprobung von Demonstratoren im Kontext der zirkulären Wertschöpfung von Werkzeugstählen	Vortrag	Th. Kästner (TKM)

1.8.1 Im Jahr 2019

Im Rahmen des Arbeitspakets 8 steht die Verbreitung der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben im Fokus. In dem Berichtszeitraum nahm Wiebke Hagedorn (*WI*) am World Resource Forum am 22. und 23. Oktober 2019 in Genf im Rahmen einer Posterpräsentation teil. Des Weiteren wurde das Projekt von Dr. Kathrin Greiff (*WI*) auf einem Workshop im Rahmen des EU-Projekts CycleSME vorgestellt. Der Workshop fand am 31. Oktober 2019 in Wuppertal statt. Dessen Zielgruppe waren KMUs aus dem Bergischen Land. Darunter war eine Mehrzahl von Unternehmen aus der metallverarbeitenden Industrie. Hier wurde das Projekt CoT als Fallbeispiel vorgestellt.

Aus der BMBF Auftaktveranstaltung im Dezember 2019 ergaben sich zudem weitere bilaterale Treffen zwischen Projekten und einzelnen Projektpartnern. Ende Januar trafen sich die Projektpartner von CoT mit dem Roh- und Reststoff-Unternehmen RHM – Projekt OptiRoDig. Daraus entstanden weitere Ideen der Zusammenarbeit hinsichtlich des derzeit noch kaum geregelten Umgangs mit Schleifschlamm.

1.8.2 Im Jahr 2020

In dem Berichtszeitraum nahm Wiebke Hagedorn (*WI*) an der Life Cycle Innovation Conference vom 26. Bis 28. August 2020 teil. Die Veranstaltung wurde kurzfristig als virtuelle Konferenz abgehalten, sodass aus einer Posterpräsentation ein kurzer Vortrag wurde (Hagedorn, Greiff, et al., 2020).

Neben der Teilnahme und den Vorträgen auf Veranstaltungen wurde zudem ein Aufsatz zur Indikatorik publiziert (Hagedorn, Kick, et al., 2020).

Weiterhin bestand ein reger Austausch zwischen dem Projekt Circular by Design und CoT, insbesondere zum Thema Geschäftsmodelle. Zudem konnte das Projekt CoT positive Beiträge zu dem Projekt RegRes (EFFRE.NRW) leisten.

1.8.3 Im Jahr 2021

Im Rahmen des Arbeitspakets 8 steht die Verbreitung der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben im Fokus. In dem Berichtszeitraum wurde ein Fernsehbeitrag im Februar 2021 mit dem und für den WDR – Lokalzeit Bergisches Land gedreht sowie ausgestrahlt. Der Beitrag enthält die Vorstellung des Projekts Circle of Tools. Darüber hinaus stellte Thomas Kästner das Projekt als Statuspräsentation bei der Dechema am 24.11.2021 und bei der Effizienz-Agentur NRW am 29.11.2021 vor. Zudem nahm Wiebke Hagedorn (*WI*) am Young Researcher Seminar for Sustainable Material Cycles als virtuelle Kurzveranstaltung (Februar) und als zweitägiges Seminar in Präsenz in Zürich (August) teil und hielt einen Vortrag zur Umweltbewertung des Repurposings und dem Einfluss des Schleifens. Einen

inhaltlich ähnlichen Vortrag hielt sie auf der internationalen Konferenz Ecobalance (März), die pandemiebedingt virtuell stattfand. Das japanische Institut ILCAJ richtet die Veranstaltung aus. Darüber hinaus hielt sie einen Vortrag zur zirkulären Geschäftsmodellentwicklung anhand des Anwendungsfalls auf der Life Cycle Management Conference in Stuttgart (September). Im Oktober stellte Wiebke Hagedorn zudem das Projekt Circle of Tools auf der Veranstaltung „ressourceneffizientes Augsburg“ vor. Im selben Monat war das Projekt Teil eines Industriekolloquiums (55 Teilnehmende) ausgerichtet vom Lehrstuhl für neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe, geleitet von Prof. Arne Röttger. In Zusammenarbeit von Prof. Arne Röttger, Wiebke Hagedorn, Lucas Wieczorek, Sebastian Jäger und Philipp Kronenberg wurde ein Paper zur zirkulären Gestaltung der Wertschöpfungskette des Kreismessers verfasst. Nachdem es im Herbst abgelehnt wurde, erfolgte die erneute Überarbeitung. Lucas Wieczorek erarbeitete zudem einen Fachbeitrag zum Thema ambulante Metallographie als Qualitätssicherungsmaßnahme für die zirkuläre Wertschöpfung hochlegierter Stähle. Der Beitrag ist von der Fachzeitschrift praktische Metallographie angenommen und wurde im Jahr 2022 veröffentlicht. Ebenfalls wurde ein Fachbeitrag „Remanufacturing - Die neue Art der Produktion Der Weg zu einer Kreislaufwirtschaft (ISSN: 2191-1347)“ im Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik durch Lucas Wieczorek und Philipp Kronenberg veröffentlicht.

Im September erfolgte zudem der erste Transferworkshop des Projekts mit 20 teilnehmenden Unternehmen aus dem Bergischen Städtedreieck. Die Veranstaltung wurde von der Neuen Effizienz durchgeführt. Dabei ging es primär um die Vermittlung des Fallbeispiels und der ersten Ergebnisse. Darüber hinaus diskutierten die Teilnehmenden in Breakout Sessions die Chancen und Herausforderungen in der Übertragung und Umsetzung zirkulärer Konzepte. In dem Rahmen wurde ebenfalls eine Verbindung zu der Initiative Bergisch.Metall hergestellt, die von der Neuen Effizienz geleitet und vorgestellt wurde.

Weiterhin besteht ein reger Austausch zwischen dem Projekt Circular by Design und CoT. Es gab auch Austausch mit anderen Projekten über das ReziProk Cluster hinaus. So kam es zum Austausch zwischen dem Projekt RegRess (EFFRE.NRW) und CoT. Wie im vorigen Bericht erwähnt, kam es zur Diskussion und dem Ausprobieren weiterer Produkte für das Repurposing. Dazu wurden weitere Produkte und Produktportfolios von Unternehmen innerhalb und außerhalb des Projekts CoT in Betracht bezogen.

1.8.4 Im Jahr 2022

WI

Gemeinsam mit mehreren Projekten, die am Wuppertal Institute liefen sowie in Kollaboration mit der Neuen Effizienz wurde ein Multiplikatorenworkshop zum Thema Neue Wege für industrielle Kooperationen zur Strukturstärkung im Bergischen Land – Beispiele der industriellen Symbiose und der Kaskadennutzung in der metallverarbeitenden Industrie (<https://bergisch-metall.de/event/neue-wege-furs-bergische/>) durchgeführt, bei dem unter anderem Ansatz und Ergebnis des Projektes CoT vorgestellt wurden.

Am 12.07. fand ein Austauschtermin mit der Bergischen IHK statt, um das Konzept des Projektes für die Übertragung auf anderen Unternehmen bekannt zu machen. Der Termin wurde gemeinsam mit der neuen Effizienz wahrgenommen.

Ebenfalls gemeinsam mit der Neuen Effizienz wurde im Oktober 2022 ein digitaler Transferworkshop zum Thema „Aus Alt mach Neu! Chancen nutzen durch industrielle Aufbereitung von Altmetallen“ angeboten (<https://events.neue-effizienz.de/event/aus-alt-mach-neu/>).

BUW

Der Fachartikel "Quantification of methods used in field metallography using the example of quality assurance measures for a circular economy for high-alloy steels" wurde im Journal "Praktische Metallographie" veröffentlicht.

Weiterhin wurde am 05.10.2022 ein Workshop durch die „Neue Effizienz“ mit allen Projektpartner und interessierten Firmen durchgeführt, um Impulse für die Bergische Wirtschaft zu geben, in das Remanufacturing einzusteigen. (<https://events.neue-effizienz.de/event/aus-alt-mach-neu/>).

TKM

Für die Aprilausgabe bergischen IHK gaben die Industriepartner Kirschen, Freund und TKM ein Interview zum Thema Kreislaufwirtschaft. Hier wurde ausführlich auf die Vorgehensweise und die damit verbundenen Erfahrungen berichtet.

<https://www.bergische-wirtschaft.net/66-2376-nachhaltige-wirtschaft.html>

Am 23. und 24.06.2022 fand die ReziProK-Transferkonferenz in Berlin statt. Herr Kästner stellte dem Fachpublikum das Projekt und die bis dahin vorhandenen Ergebnisse vor.

<https://innovative-produktkreislaeufe.de/Projekte/Circle+of+Tools+ +CoT -p-42.html>

Weiterhin wurde am 05.10.2022 ein Workshop durch die „Neue Effizienz“ mit allen Projektpartner und interessierten Firmen durchgeführt, um Impulse für die Bergische Wirtschaft zu geben, in das Remanufacturing einzusteigen.

(<https://events.neue-effizienz.de/event/aus-alt-mach-neu/>).

2 Verwertungsplan

2.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind den Verwertungsplänen der einzelnen Projektpartner zu entnehmen.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle anvisierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Zusätzliche Ressourcen für das Projekt waren nicht nötig, so dass keine zusätzlichen Kosten entstanden sind.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die gewonnenen Ergebnisse besitzen eine hohe industrielle und wissenschaftliche Relevanz und bieten daher ein hohes Verwertungspotenzial. Die neu entwickelten Remanufacturing- und Repurpose-Fertigungsroute ermöglichen eine deutliche Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz, wodurch sich auch ökonomische Vorteile ergeben.

So können verschleißbedingte Instandhaltungskosten minimiert und gleichzeitig Herstellungskosten von Produkten auf einem niedrigeren Preisniveau gehalten werden, wodurch die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie gefördert wird. Durch die Reduzierung des Bedarfs an seltenen Legierungselementen, sowie Rohstahl und Energieaufwand in der Werkzeugherstellung, können diese Elemente zudem gezielt für zukünftige Technologien wie bspw. in der Schneidwaren- und metallverarbeitenden Industrie genutzt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die mit der erfolgreichen Entwicklung einer Circular Economy wissenschaftlich erreichten Teilziele erfolgreich in die technologische Anwendung übertragen werden konnten.

Das Remanufacturing erwies sich bei großen Kreismessern, die zu kleineren umgearbeitet werden, als wirtschaftlich tragbar. Durch das Projekt wurden Kenntnisse über Prozesse und Fertigkeiten erlangt, mit denen die Umsetzung des Remanufacturings gelingt. Dieser Prozess wird wahrscheinlich kurzfristig umgesetzt.

Das Repurposing wird zukünftig hauptsächlich dann umgesetzt, wenn in der Produktion Ausschuss entsteht, der in der Regel keine Nachteile für eine Zweitverwendung aufweist. Aufgrund der Nichtvorhersagbarkeit des Entstehens von Ausschuss kann allerdings keine planbare Materialbelieferung erwartet werden.

Unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten können auf Basis der gewonnenen Ergebnisse weitere werkstofftechnische Fragestellungen formuliert werden, welche im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten untersucht werden sollten.

2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des Projektzeitraums sind keine Kenntnisse über Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Umsetzung des Vorhabens eine außerordentliche Relevanz darstellten. Eine Änderung der Vorgehensweise war daher nicht nötig. Zusätzlich zum Studium von Grundlagenliteratur und Fachzeitschriften wurden zum wissenschaftlichen Austausch nationale Konferenzen besucht. Diese wurden bereits im Kapitel 1.8 erläutert.

2.5 Erfolgte / geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes „C.O.T.“ ermittelten Ergebnisse und Fortschritte wurden und werden im Rahmen von Fachbeiträgen, Präsentationen auf nationalen Tagungen sowie durch die im Rahmen des Projektes entstehende Dissertationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Bei denen im Berichtszeitraum erfolgten Veröffentlichungen wird an dieser Stelle wieder auf Kapitel 1.8 verwiesen.

Im Rahmen von Promotionen sind im Jahr 2023 weitere Veröffentlichungen geplant. Da deren Inhalte noch nicht final geklärt sind und um diesen nicht vorweg zu greifen, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

2.6 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Umsetzung der Ergebnisse aus dem Projekt wird bei TKM vorangetrieben, erfordert aber auch noch einige Zeit, um die Prozesse zu etablieren. Seitens TKM besteht damit erst einmal kein Bedarf an weiteren Vertiefungen hinsichtlich der Circular Economy.

Von der wissenschaftlichen Seite haben sich im Rahmen des Projekts Perspektiven eröffnet, die mögliche nächste innovatorische Schritte mit sich ziehen könnten. So war der Austausch zwischen weiteren ReziProk Projekten wie OptiRoDig und CbD fruchtbar, hat jedoch im Berichtszeitraum seitens WI noch nicht zu konkreten Projektanträgen der Beteiligten geführt. Grundsätzlich verfolgt das WI jedoch die Forschung zum (zirkulären) Stoffstrommanagement von Metallen weiter und hat so als Konsortialpartner unter anderem erfolgreich Forschungsmittel eingeworben für das Projekt “RESILIENT - Ressourceneffiziente Integration multifunktionaler Lasermaterialbearbeitungsverfahren im Prozessnetz für die Leichtbau-Fertigung“¹. Darüber hinaus befindet sich seitens WI ein weiterer Antrag in Prüfung der im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms beim BMWK eingereicht wurde, für den bereits ein initiales positives Signal gegeben wurde, der sich im Bereich der iterativen (zirkulären, nachhaltigen) Produktentwicklung bewegt (aus Gründen der Vertraulichkeit noch nicht nennbar). Im Rahmen des Kompetenzverbundes bergisch.metall werden perspektivisch noch weitere Projekte mit regionalem und überregionalem Bezug entwickelt werden, die sich im Bereich der Metallverarbeitung und zirkulären metallischen Stoffströmen bewegen (<https://bergisch-metall.de/unsere-partner/>).

2.7 Ausgaben- und Zeitplan

Das Begin des Vorhabens kam es zu einem leicht verzögerten Projektbeginn. Die mit der Corona-Pandemie eingehende Kontaktbeschränkungen und Tätigkeiten im Home-Office führten zu einer Verlangsamung des Projektfortschritts. Eine kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate wurde im Januar 2022 beantragt und im März 2022 stattgegeben. Die Forschungsziele wurden im verlängerten Zeitraum erreicht.

¹ https://www.ilt.fraunhofer.de/de/projekte/vp_laufend/verbundprojekt-resilient.html

3 Glossar

Begriff (Abkürzung)	Definition
Circular Economy (CE)	„Die Circular Economy ist ein industrielles System, das durch Absicht und Design wiederherstellend oder regenerativ ist. Es ersetzt das Konzept des Lebenszyklusendes durch die Wiederherstellung [...] und zielt auf die Beseitigung von Abfällen durch die Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und, in diesem Zusammenhang, Geschäftsmodellen ab.“ (Ellen MacArthur Foundation, 2012, S. 7)
Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)	englisch: energy dispersive X-ray spectroscopy. Messmethode der Materialanalytik. Atome in der Probe werden durch einen Elektronenstrahl angeregt. Durch Rückstrahlung von charakteristischer Röntgenstrahlung der Elemente kann die Elementzusammensetzung der Probe ermittelt werden.
Kreislaufwirtschaft	Der deutsche Begriff der „Kreislaufwirtschaft“ ist dem englischen Begriff der „Circular Economy“ sehr ähnlich. Aufgrund der starken Prägung des deutschen Begriffs durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz, wird hier auf die Verwendung verzichtet. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz ist die Neuerung des Abfallwirtschaftsgesetzes, was zu möglichen Fehlinterpretationen führt.
Life Cycle Assessment (LCA)	Die LCA ist eine systematische Analyse und Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten für den gesamten Lebenszyklus. Die LCA ist in der DIN EN ISO 14040/14044 genormt. Synonyme für die LCA sind auch Ökobilanz und Lebenszyklusanalyse.
Optische Emissionsspektroskopie (OES)	Messverfahren zur Identifizierung von Elementen in Metallen. Spektralanalyse zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von metallischen Werkstoffen.
Rasterelektronenmikroskop (REM)	Hochauflösendes Mikroskop welches über einen Elektronenstrahl Wechselwirkungen mit den im zu vergrößernden Objekt vorhandenen Elektronen

	verursacht. Über diese Wechselwirkung werden die Aufnahmen erzeugt.
Remanufacturing	Ist ein Konzept der Circular Economy. Dabei handelt es sich um die Nutzung von Modulen/ Bauteilen eines defekten Produkts in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion.
Repurposing	Ist ein Konzept der Circular Economy. Dabei handelt es sich um die Nutzung von Modulen/ Bauteilen eines defekten Produkts in einem neuen Produkt mit einer neuen Funktion.
Standzeit	Die Standzeit von Werkzeugen beschreibt die Zeit, in der das unterbrechungsfreie Arbeiten möglich ist, bis erhebliche Verschleißerscheinungen auftreten, die eine Erneuerung, Überholung oder Auswechslung erfordern.
Zirkuläre Wertschöpfung	Ist ein deutsches Synonym für den Begriff und das Konzept der Circular Economy (DIN EN ISO 4957, 2018)

4 Literaturverzeichnis

- 320°. (2021). *BMU arbeitet an digitalem Produktpass*. Zugriff am 02.11.2021: <https://320grad.de/2021/06/16/bmu-arbeitet-an-digitalem-produktpass/>
- Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut. (2021). *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Analyse zur Stahlbranche*. Zugriff am 08.12.2021: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/AEW_230_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Stahl_WEB.pdf
- Azevedo, S., Godina, R., & Matias, J. (2017). Proposal of a Sustainable Circular Index for Manufacturing Companies. *Resources*, 6(4), 63. <https://doi.org/10.3390/resources6040063>
- Bahn-Walkowiak, B., & Wilts, H. (2020). *Circular Economy Leitbild und Vision*. Wuppertal-Inst. für Klima, Umwelt, Energie. https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/FS_NHS_NRW_FM_E2_Circular_Economy.pdf
- BMU. (o.J.). *Industrie 4.0 & Kreislaufwirtschaft*. Zugriff am 02.11.2021: <https://www.bmu.de/digitalagenda/industrie-40-kreislaufwirtschaft>
- BMU. (2021). *Eckpunkte für eine Förderrichtlinie Klimaschutzverträge zur Umsetzung des Pilotprogramms „Carbon Contracts for Difference“*. Entwurf Stand 21.04.2021. Zugriff am 14.12.21: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/eckpunktepapier_klimaschutzvertraege_ccfd_bf.pdf
- BMUV. (2020). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023.
- BMWi (2020). *Was sind eigentlich Carbon Contracts for Difference?* Zugriff am 08.12.2021: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/12/Meldung/direkt-erklaert.html>
- BMWi. (2021). *Transformation der Stahlindustrie und Handlungskonzept Stahl*. Zugriff am 08.12.2021: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/20210503-transformation-der-stahlindustrie-und-handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- BDI. (2019). *Product Environmental Footprint (PEF): Methodik noch nicht anwendungsreif*. <https://bdi.eu/artikel/news/product-environmental-footprint-pef-methodik-noch-nicht-anwendungsreif/>
- Bocken, N. M. P., Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product Design and Business Model Strategies for a Circular Economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. (2021). *Sustainable Business Canvas*. start green. <https://start-green.net>
- Boyer, R. H. W., Hunka, A. D., Linder, M., Whalen, K. A., & Habibi, S. (2021). Product Labels for the Circular Economy: Are Customers Willing to Pay for Circular? *Sustainable Production and Consumption*, 27, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.010>
- C2C. (2014). *Pilot study. Impacts study of the cradle to cradle certified products program*. www.c2ccertified.org/impact-study

- Cullen, J. M., Allwood, J. M., & Bambach, M. D. (2012). Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-Use Goods. *Environmental science & technology*, 46(24), 13048–13055.
- DERA 2021a: BGR Metallpreisindex Juni 2021, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2021/06-21/2021-06-preisindex.pdf?blob=publicationFile&v=2>
- DERA. (2021b). BGR Preismonitor Juni 2021, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2021/06-21/2021-06-preismonitor.pdf?blob=publicationFile&v=2>
- DERA. (2021c). BGR Volatilitätsmonitor Juni 2021, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2021/06-21/2021-06-volatilitaetsmonitor.pdf?blob=publicationFile&v=2>
- Destatis. (2021). *Erzeugerpreisindex gewerblicher Produkte*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/inhalt.html#_cxwwgshrc
- DIN. (2020a). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. EN ISO 14040:2006 + Amd 1:2020. Beuth Verlag.
- DIN (2020b). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*. EN ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020. Beuth Verlag.
- DIN 8590:2003-09: Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- DIN EN 10132-4:2003-04: Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung – Technische Lieferbedingungen – Teil 4: Federstähle und andere Anwendungen; Deutsche Fassung EN 10132-4:2000
- DIN EN ISO 683-1:2018-09: Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil1: unlegierte Vergütungsstähle (ISO 683-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 683-1:2018
- DIN EN ISO 4957:2018-11: Werkzeugstähle (ISO 4957:2018); Deutsche Fassung EN ISO 4957:2018
- DIN EN ISO 6507-1:2018-07: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers -Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 6507-1:2018
- DNR (Deutscher Naturschutzring) 2018: *Ressourcenschonung: Steuern rauf, Verbrauch runter?!* Steckbrief. Zugriff am 02.11.2021: https://www.dnr.de/fileadmin/Publikationen/Steckbriefe_Factsheets/18_02_R2-0_Steckbrief_Ressourcensteuern.pdf
- Europäische Kommission. (2021). *Fragen und Antworten: Einigung über neue Vorschriften für Mehrwertsteuersätze*. Zugriff am 08.12.2021: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_21_6609

- EC. (2017). *PEFCR Guidance document. Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3*. Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring Circular Economy Strategies through Index Methods: A Critical Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Ellen MacArthur Foundation (Hrsg.). (2012). *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>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Circularity Indicators. An Approach to Measuring Circularity*. Ellen MacArthur Foundation; Granta.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). *Circulytics—Measuring circularity*. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circulytics-measuring-circularity>
- European Commission. (2021). *Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations*. C(2021) 9332 final. European Commission.
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe*. European Commission.
- European Commission & Joint Research Centre. (2010). *ILCD handbook: General guide for life cycle assessment: detailed guidance*. Publications Office of the European Union. <http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>
- Eurovent. (2021). *Product Environmental Footprint (PEF) and MEErP (GEN - 1248.00)*. <https://eurovent.eu/?q=articles/product-environmental-footprint-pef-and-meerp-gen-124800>
- Finkbeiner, M., Bach, V., & Lehmann, A. (2018). *Environmental Footprint: Der Umwelt-Fußabdruck von Produkten und Dienstleistungen. Abschlussbericht* (UBA-Forschungsbericht TEXTE 76/2018). Umweltbundesamt.
- Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., & Weigel, M. (2014). Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production*, 84, 563–580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>
- Franchise Portal. (2021). *Was sind Förderprogramme?* Definition. Zugriff am 03.11.2021: <https://www.franchiseportal.de/definition/foerderprogramme-a-4750>
- Franklin-Johnson, E., Figge, F., & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.023>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

- GRI. (2020). *GRI 306: Abfall*. http://www.respect.at/dl/upNoJLJNmoJqx4OooJK/german-gri-306-waste-2020_pdf
- Hagedorn, W., Gramlich, A., Greiff, K., & Krupp, U. (2022). Alloy and process design of forging steels for better environmental performance. *Sustainable Materials and Technologies*, e00509. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00509>
- Hagedorn, W., Greiff, K., Bienge, K., & Faulstich, M. (2019). *Measuring the Environmental Impact of the Circular Economy Concepts using the Example of Steel Tools*. World Resource Forum, Genf.
- Hagedorn, W., Greiff, K., Bienge, K., & Liedtke, C. (2021). *Circular Economy Strategies in Practice. Ecological Potentials of Linking Value Chains in the Metalworking Industry*. EcoBalance 2020, Sendai.
- Hagedorn, W., Greiff, K., & Liedtke, C. (2020). *The Environmental Impact of Steel Tools designed for Re-Manufacturing and Re-purposing*. Life Cycle Innovation Conference 2020, Berlin.
- Hagedorn, W., Jäger, S., Wieczorek, L., Kronenberg, P., Greiff, K., Weber, S., & Roettger, A. (2022). More than recycling – The potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134439>
- Hagedorn, W., Kick, M., Greiff, K., & Jarchow, S. (2020). Zirkuläres Wirtschaften auf Produktebene. *MÜLL und ABFALL*, 10, 6. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2020.10.06>
- Hammer, M., Champy, J., & Künzel, P. (2003). *Business reengineering: Die Radikalkur für das Unternehmen* (7. Aufl.). Campus-Verl.
- Hiebel, M., Nühlen, J. (2016): *Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott)*, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), Oberhausen.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). (2021): *Mehr Fortschritt wagen Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Zugriff am 08.12.2021: <https://www.wiwo.de/downloads/27830022/8/koalitionsvertrag-2021-2025.pdf>
- Kristensen, H. S., & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>
- KrWG, (2012). Kreislaufwirtschaftsgesetz - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- Liedtke, C., Bienge, K., Wiesen, K., Teubler, J., Greiff, K., Lettenmeier, M., & Rohn, H. (2014). Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. *Resources*, 3(3), 544–574. <https://doi.org/10.3390/resources3030544>

- Lindkvist, L., & Sundin, E. (2016). The role of Product-service Systems Regarding Information Feedback Transfer in the Product Life-cycle Including Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 47, 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.088>
- Martens, H., & Goldmann, D. (2016). *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis* (2. Aufl. 2016). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Mayer, J., Bachner, G., & Steininger, K. W. (2019). Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1517–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.118>
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things* (1st ed). North Point Press.
- Milios, L. (2021). *Towards a Circular Economy Taxation Framework: Expectations and Challenges of Implementation*. In *Circular Economy and Sustainability* (2021) 1:477–498. <https://doi.org/10.1007/s43615-020-00002-z>
- MWDE. (2021). *Kohlenstoff kann Klimaschutz*. Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen. Zugriff am 02.11.2021: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/mwide_carbon_management_strategie_nrw.pdf
- Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLoS ONE*, 9(7), e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>
- Oberpriller, Q.; Weber, F.; Iten, R.; Fasko, R. & Frei, U. (2019). *Beurteilung von ausgewählten Massnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft in der Nutzungsphase*. Schlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes für Umwelt (BAFU) Schweiz. Auftragnehmer: INFRAS & Rytec Circular. Zugriff am 14.12.2021: https://www.infras.ch/media/filer_public/da/e3/dae37037-a8a9-4c36-9206-e76ca0ffb8bf/massnahmen-foerderung-kreislaufwirtschaft.pdf
- OECD. (2019). *Global material resources outlook to 2060*. OECD Publishing.
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2011). *Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer* (J. T. A. Wegberg, Übers.). Campus Verlag.
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J., & Rechberger, H. (2019). Measuring the circular economy—A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357>
- Pastor, M. C., Mathieux, F., & Brissaud, D. (2014). Influence of Environmental European Product Policies on Product Design-current Status and Future Developments. *Procedia CIRP*, 21, 415–420. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.130>
- Pauliuk, S. (2018). Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- Pauliuk, S., Milford, R. L., Müller, D. B., & Allwood, J. M. (2013). The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3448–3454. <https://doi.org/10.1021/es303149z>
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular economy: measuring innovation in the product chain. *Planbureau voor de Leefomgeving*, (2544).

Prognos (2018). Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft.

https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/prognos_statusbericht_2018.pdf

Prognos (2020). *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020*. Zugriff am 21.12.2021:

https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/01-bvse/2020/November/Statusbericht_der_deutschen_Kreislaufwirtschaft_2020.pdf

Raatz, S., Seidel, P., Tuma, A., Helbig, C., Thorenz, A., Reller, A., Faulstich, M., Joachimsthaler, C., Steger, S., Hagedorn, W., Bickel, M., & Liedtke, C. (2022). *OptiMet. Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie—Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling* (Abschlussbericht Nr. 81/2022). Umweltbundesamt.

Ruge, J., & Wohlfahrt, H. (2013). *Technologie der Werkstoffe*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-01881-8>

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A Taxonomy of Circular Economy Indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>

Schmidt-Bleek, F., & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.). (1998). *MAIA: Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept*. Birkhäuser.

Schut, E., Crielaard, M., & Mesman, M. (2015). *Circular Economy in the Dutch Construction Sector. A Perspective for the Market and Government*. Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving.

<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0024.pdf>

Tukker, A. (2004). Eight types of product–service system: Eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. *Business Strategy and the Environment*, 13(4), 246–260.

<https://doi.org/10.1002/bse.414>

UBA. (2017). *Strategien gegen Obsoleszenz - Sicherung einer Produktmindest-lebensdauer sowie Verbesserung der Produktnutzungsdauer und der Verbraucherinformation*. Zugriff am 02.11.2021:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017_11_17_uba_position_obsoleszenz_dt_bf.pdf

UBA. (2019). *Positionspapier zur Primärbaustoffsteuer*. Zugriff am 20.12.2021:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190819_uba_pos_primarbaustoffsteuer_bf.pdf

UBA (2020). *Indikator: Gesamtrohstoffproduktivität*. Zugriff am 03.11.2021:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-gesamtrohstoffproduktivitaet#die-wichtigsten-fakten>

UBA. (2021a). *Innovationen für die Circular Economy - Aktueller Stand und Perspektiven*. Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der deutschen Umweltinnovationspolitik. Zugriff am 02.11.2021:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/innovationen-fuer-die-circular-economy-aktueller>

UBA. (2021b). *Optionen für ökonomische Politikinstrumente zur Steigerung der Ressourceneffizienz*. Policy Paper. Zugriff am 02.11.2021:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/policy-paper-optionen-fuer-oekonomische>

WBCSD. (2019). *Circular Transition Indicators*. WBCSD.

Wöhe, G., Döring, U. (2013). *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Verlag Franz Vahlen.

WWF & Wuppertal Institut 2021: *Vom Flickenteppich zur echten Kreislaufwirtschaftsstrategie*. Impulspapier. Zugriff am 02.11.2021: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Impulspapier-circular-economy.pdf>