



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



ReziProK  
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft -  
Innovative Produktkreisläufe



FONA  
Ressourceneffizienz  
BMBF

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Teil 1 – Kurzbericht

# C.O.T - Circle of Tools

Förderkennzeichen: 033R230

2023

## **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

1	Aufgabenstellung.....	1
1.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	2
2	Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn .....	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	9
4	Wesentliche Ergebnisse .....	13
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	15

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Relevante Literatur aus dem Themengebiet der Circular Economy und der Ressourceneffizienz die zu Beginn des Projektes zur Verfügung stand.....	3
--	---

## Kurzdarstellung

### 1 Aufgabenstellung

Das **zentrale Anliegen** des Projektes besteht darin, regionale Stoffkreisläufe in der metallverarbeitenden Industrie zu schließen – mit einem Schwerpunkt auf (Hand-) Werkzeuge und Schneidwaren – sowie dies durch den Einsatz digitaler Technologien zu organisieren und zu optimieren. Das **Ziel** ist, Ressourcen- und Energieverbräuche zu reduzieren sowie ökonomische Vorteile für die Unternehmen zu realisieren. Im Detail soll es darum gehen, verschlissene metallische Produkte am End-of-Life nicht einer Verwertung durch Umschmelzen zuzuführen, sondern durch Remanufacturing und Repurposing die Nutzungsdauer der mit hohem Energie- und Ressourcenaufwand erzeugten Metalle zu verlängern. Diese Ansätze sollen unternehmensübergreifend aufgestellt werden und erfordern eine digital unterstützte Logistikkette sowie eine vollständige Rückverfolgbarkeit. Eine Rückführung verschlissener Maschinenmesser lohnt sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht, wenn dieses Material nur den Schrottpreis aufweist. Im Projekt „Circle of Tools“ soll daher ein neues Geschäftsmodell entwickelt werden, das darauf basiert, sortenreine, qualitativ hochwertige Materialien entweder im primären Herstellungsprozess zu nutzen oder zur Weiterverarbeitung in andere Herstellungsprozesse unternehmensübergreifend zu integrieren. Neben den rein technischen Möglichkeiten werden betriebswirtschaftliche Faktoren, das Ressourceneffizienzpotenzial und der rechtliche Rahmen untersucht.

Die in der europäischen Abfallrahmenrichtlinie und dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz verankerte Abfallhierarchie geht von der grundsätzlichen ökologischen Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Stufen aus. Während das stoffliche Recycling von Produkten in der Regel vorteilhafter ist als ihre thermische Verwertung oder Deponierung, sind Reuse/Kaskadennutzung demnach ökologisch vorteilhafter als sämtliche Recyclingtechnologien. Die Datenlage ist hier jedoch im Vergleich zu vielen Recyclingtechnologien noch äußerst lückenhaft und unsystematisch. Einzelne Untersuchungen weisen jedoch auf signifikante Ressourceneffizienzpotenziale hin. Abschätzungen zeigen, dass die in diesem Vorhaben angedachte Reuse-/Kaskadennutzung zu einer Einsparung von 300 Tonnen Primär-Werkzeugstahl führen könnte. Das Vorhaben kann diese signifikanten Potenziale nachweisen und gleichzeitig geeignete und übertragbare Geschäftsmodelle aufzeigen. Auf Grundlage der empirischen Erhebungen werden im Projekt genaue Wirkungen berechnet für folgende Fragen: (1) Welche Mengen an Rohstoffe können durch Remanufacturing/Repurposing eingespart werden? (2) Welche ökonomische Wertschöpfung ist damit zu erzielen? (3) Wie ist ein Remanufacturing/Repurposing im Vergleich zu anderen Verwertungsverfahren ökologisch und ökonomisch einzuschätzen?

Der **übergeordnete Beitrag** des beantragten Projekts „Circle of Tools“ zu den förderpolitischen Zielen liegt in dem modellhaften Umbau eines Industriezweigs zu einer Wirtschaftsweise mit geschlossenen Kreisläufen. Es wird beispielhaft dargestellt, wie die Nutzungsdauer von hochwertigen Materialien verlängert werden kann und die Rohstoffe mit möglichst wenig Verlusten im Wirtschaftszyklus gehalten werden können. Es wird aufgezeigt, welche digitalen Unterstützungen, Akteursnetzwerke und -kooperationen und betrieblichen und marktwirtschaftlichen Organisationsprozesse für eine Umsetzung notwendig sind und welche

ökonomischen und ökologischen Potenziale diese innovative Wirtschaftsweise über den betrachteten Wirtschaftszweig sowie die Region hinaus beinhaltet. Im Einzelnen lässt „Circle of Tools“ folgende Beiträge zu den förderpolitischen Zielen erwarten:

- Innovative Geschäftsmodelle für die Kreislaufwirtschaft

In dem Projekt soll ein Konzept für eine regionale Circular Economy (CE) entwickelt werden und durch die Integration der jeweiligen Hauptakteure untersucht werden, inwieweit das entwickelte Geschäftsmodell marktfähig gemacht werden kann und welche Voraussetzungen dafür notwendig sind. Eine vollständige Rückführung von verschlissenen Maschinenmessern lohnt sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht, da dieses Material zum Schrottpreis über den Schrotthandel weiterverwendet wird. An diesem Punkt setzt das Projekt „Circle of Tools“ an. Es soll ein neues Geschäftsmodell entwickelt werden, das darauf basiert, sortenreine, qualitativ hochwertige Materialien entweder im primären Herstellungsprozess zu nutzen oder zur Weiterverarbeitung in andere Herstellungsprozesse unternehmensübergreifend zu integrieren. Neben den rein technischen Möglichkeiten werden betriebswirtschaftliche Faktoren, das Ressourceneffizienzpotenzial und auch der rechtliche Rahmen untersucht.

- Kreislaufschließung durch digitale Technologien

Eine digitale Steuerung von Prozessen der Herstellung und Organisation/Disposition sind heute Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit von Betrieben. Die in dem Projekt „Circle of Tools“ zu entwickelnde Rückführung kann auch nur über eine digitale Kennzeichnung zum Beispiel über einen Datamatrix-Code und die entsprechende Anbindung zum bestehenden ERP-System erfolgen. Untersucht werden soll darüber hinaus, ob es weitere Möglichkeiten für eine digitale Kennzeichnung gibt, die auch eine Datensammlung während des Nutzungsprozessen erlaubt.

Damit verfolgt dieser Projektansatz das förderpolitische Ziel, eine innovative zirkuläre Wirtschaftsweise aufzeigen, die über den Demonstrator hinaus direkt in der Praxis einsetzbar und auf andere Regionen und Wirtschaftszweige übertragbar ist.

## **1. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt wurde von insgesamt sechs Kooperationspartnern bearbeitet, wovon zwei Forschungseinrichtungen, ein Consulting-Partner und drei Unternehmen aus der metallverarbeitenden Industrie darstellen. Für die Durchführung der umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten waren die beiden Partner Wuppertal Institut (WI) und die Bergische Universität Wuppertal (BUW, Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe) verantwortlich. Die für die Durchführung der Forschungsarbeiten notwendige technische Ausstattung in Form von Metallurgie-, Prozess- und Mikroskopietechnik standen teilweise zur Verfügung. Weitere benötigte Geräte, Anlagen und Fertigungsschritte wurden entsprechend des Mittelverwertungsplans der einzelnen Projektpartner beschafft. Die Industriepartner *TKM*, *Kirschen* und *Freund* sind allesamt nicht konkurrierende Verarbeiter von Werkzeugstahl, so dass die Möglichkeit gegeben war, untereinander Materialien weiter zu geben, um neue Formen der Kooperation mit dem Ziel einer gesteigerten Nachhaltigkeit zu erforschen. Die Transformationsberatung *Plan Consult* begleitete den Prozess hinsichtlich der notwendigen

Anpassungen in den internen und externen Prozessen, den gesetzlichen bilanziellen Vorgaben, sowie den nötigen Anpassungen in den betroffenen IT-Systemen dem Warenwirtschaftssystem.

## 2 Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Ausgangspunkt im Bereich der Circular Economy war der Verschleiß von Schneidwerkzeugen, sogenannten Maschinenkreismesser, die in der industriellen Verarbeitung zur Trennung von Hygienepapieren eingesetzt werden. Bedingt durch die starken Belastungen während des Betriebs, kommt es hierbei zum verstärkten Verschleiß und nach einer geringfügigen Einsatzzeit zum Austausch dieser Kreismesser. Die verschlissenen Maschinenkreismesser werden im normalen Betrieb entsorgt, so dass verschlissene Maschinenkreismesser bereits nach kurzen Einsatzzeiten unter hohem Energie- und Ressourcenaufwand durch neue ersetzt werden müssen. Ein neuwertiges Maschinenkreismesser wird aus dem ledeburitischen Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) gefertigt und wiegt ca. 6 kg. Am Ende des Lebenszyklus (verschlissenes Maschinenkreismessers) ist ein Materialabtrag, durch nachschleifen und schärfen im Prozess, von rund 1 kg zu verzeichnen. Ein verschlissenes Maschinenkreismesser wiegt demnach noch 5 kg und wird entsorgt. Das bedeutet, dass 5 kg hochwertiges Material entsorgt wird und durch einen enormen energetischen Mehraufwand und Ressourcenaufwand eingeschmolzen und neu produziert wird.

Mit dem Ziel die bisherige lineare Wertschöpfungskette des Materials durch eine Kreislaufwirtschaft zu ersetzen, lag die Herausforderung darin, die Lebensdauer des verwendeten ledeburitischen Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) durch Remanufacturing oder Repurposing zu maximieren. Die Optimierung, Anpassung und der Nutzen einer Circular Economy wurde in der Vergangenheit in diversen Studien und Forschungen behandelt und ist zudem in Grundlagenliteratur beschrieben. Aus **Tabelle 1** sind wesentliche Publikationen aus diesem Themenfeld zu entnehmen.

**Tabelle 1:** Relevante Literatur aus dem Themengebiet der Circular Economy und der Ressourceneffizienz die zu Beginn des Projektes zur Verfügung stand.

Autor(en)	Jahr	Titel
Steffen et al.	2015	Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 347. <a href="https://doi.org/10.1126/science.1259855">https://doi.org/10.1126/science.1259855</a>
Steffen et al.	2004	Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure. Springer Berlin Heidelberg
Bringezu et al.	2017	ASSESSING GLOBAL RESOURCE USE. A systems approach to resource efficiency and pollution reduction.
Lutter et al.	2018a	The Materialflow Analysis Portal. Data Visualisation Centre.
Lutter et al.	2018b	Die Nutzung natürlicher Ressourcen Bericht für Deutschland 2018.

<b>Schmidt-Bleek</b>	1998	MAIA : Einführung in die Material -Intensitäts-Analyse nach dem MIPS -Konzept. Birkhäuser, Basel
<b>Fischer-Kowalski et al.</b>	2011	DECOUPLING NATURALRESOURCE USEANDENVIRONMENTAL IMPACTSFROM ECONOMIC GROWTH
<b>Greiff and Faulstich</b>	2018	RESOURCE EFFICIENCY:TRENDS AND THEPOTENTIAL OF CIRCULAR ECONOMY
<b>Pearce and Turner</b>	1990	Economics of natural resources and the environment.
<b>Kirchherr et al.</b>	2017	Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resour. Conserv. Recycl. 127, 221–232. <a href="https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005">https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005</a>
<b>Aguilar-Hernandez et al.</b>	2018	Assessing circularity interventions: a review of EEIOA-based studies. J. Econ. Struct. 7, 14. <a href="https://doi.org/10.1186/s40008-018-0113-3">https://doi.org/10.1186/s40008-018-0113-3</a>
<b>Ellen MacArthur Foundation</b>	2013	Towards a circular economy. Opportunities for the consumer goods sector.
<b>Bocken et al.</b>	2017	Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. J. Ind. Ecol. 21, 476–482. <a href="https://doi.org/10.1111/jiec.12606">https://doi.org/10.1111/jiec.12606</a>
<b>Reike et al.</b>	2018	The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. Resour. Conserv. Recycl. 135, 246–264. <a href="https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027">https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027</a>
<b>Potting et al.</b>	2017	CIRCULAR ECONOMY: MEASURING INNOVATION IN THE PRODUCT CHAIN. Policy Report.
<b>Cooper and Gutowski</b>	2017	The Environmental Impacts of Reuse: A Review. J. Ind. Ecol. 21, 38–56. <a href="https://doi.org/10.1111/jiec.12388">https://doi.org/10.1111/jiec.12388</a>
<b>Tolio et al.</b>	2017	Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. CIRP Ann. 66, 585–609. <a href="https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001">https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001</a>
<b>Guide</b>	2000	Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. J. Oper. Manag. 18, 467–483. <a href="https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00034-6">https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00034-6</a>
<b>Kern</b>	2017	Circular Economy. Fact. -Mag. Für Nachhalt. Wirtsch. 1–2017, 16–21.
<b>Dunant et al.</b>	2018	Options to make steel reuse profitable: An analysis of cost and risk distribution across the UK construction value chain. J. Clean. Prod. 183, 102–111. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.141">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.141</a>

<b>Cooper and Allwood</b>	2012	Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life. <i>Environ. Sci. Technol.</i> 46, 10334–10340. <a href="https://doi.org/10.1021/es301093a">https://doi.org/10.1021/es301093a</a>
<b>Saidani et al.</b>	2019	A taxonomy of circular economy indicators. <i>J. Clean. Prod.</i> 207, 542–559. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014</a>
<b>Haas et al.</b>	2015	How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. <i>J. Ind. Ecol.</i> 19, 765–777. <a href="https://doi.org/10.1111/jieec.12244">https://doi.org/10.1111/jieec.12244</a>
<b>Jacobi et al.</b>	2018	Providing an economy-wide monitoring framework for the circular economy in Austria: Status quo and challenges. <i>Resour. Conserv. Recycl.</i> 137, 156–166. <a href="https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.022">https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.022</a>
<b>Krausmann et al.</b>	2018	From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. <i>Glob. Environ. Change</i> 52, 131–140. <a href="https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003">https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003</a>
<b>(International Standard Organization)</b>	2010	ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
<b>Liedtke et al.</b>	2014	Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. <i>Resources</i> 3, 544–574.
<b>Ellen MacArthur Foundation</b>	2015	CIRCULARITY INDICATORS n Approach to Measuring Circularity PROJECT OVERVIEW.
<b>BMU</b>	2015	German Resource Efficiency Programme (ProgRes): Programme for the sustainable use and conservation of natural resources (No. 2nd edition). Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Berlin.
<b>Reck und Greadel</b>	2012	Challenges in Metal Recycling. <i>Science</i> 337, 690–695. <a href="https://doi.org/10.1126/science.1217501">https://doi.org/10.1126/science.1217501</a>
<b>Wirtschaftsvereinigung Stahl</b>	2016	Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2016“. Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2016. <a href="https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Fakten_Stahlindustrie_2016_V2.pdf">https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Fakten_Stahlindustrie_2016_V2.pdf</a>

Die globale Ressourcengewinnung hat sich während der letzten 50 Jahren exponentiell beschleunigt (Steffen et al., 2015, 2004). Im Jahr 2017 erreichte die globale abiotische und biotische Materialgewinnung eine Menge von 92 Milliarden Tonnen und damit "mehr als die dreifache Menge, die 1970 verbraucht wurde" (Bringezu et al., 2017; Lutter et al., 2018a). In Zusammenhang damit wird die Zunahme an Umweltproblemen insgesamt sowie deren zunehmende Komplexität beobachtet. Dazu gehören neben dem Ressourcenverbrauch Problematiken wie der Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Landnutzungsänderungen. Als



Lösungsansatz wird eine Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von der wirtschaftlichen Entwicklung bzw. von der Entwicklung des Wohlstands angesehen (Schmidt-Bleek, 1994, Fischer-Kowalski et al., 2011). Als Strategien wird u.a. die Ressourceneffizienz verfolgt (Greiff and Faulstich, 2018). Ein erweiterter Ansatz stellt das Konzept der „Circular Economy“ (CE) dar, das sich seit ein paar Jahren verstärkt etabliert.

CE wurde als Konzept bereits in den 1990er Jahren von Pearce und Turner (Pearce and Turner, 1990) benannt als ein Modell zur Transformation der linearen Wirtschaftsweise in ein geschlossenes System, in dem alle Rohstoffe im Kreislauf gehalten werden. Seit ein paar Jahren erfährt dieses Konzept eine Renaissance. Kirchherr et al. (Kirchherr et al., 2017) zeigen eine Zunahme von wissenschaftlichen Artikeln vom Jahr 2014 auf 2016 um den Faktor 3,3. Als Ergebnis der Auswertung der über 114 Studien zum Konzept einer CE wird nach dieser Studie die Definition abgeleitet: „CE ist ein ökonomisches System, das die Entsorgung von Produkten am Lebensende durch ein Set an Maßnahmen zur Kreislaufführung ersetzt“ (ebd.). Diese Maßnahmen basieren auf drei Prinzipien (Aguilar-Hernandez et al., 2018; Ellen MacArthur Foundation, 2013):

- Nutzung von Abfallströmen als Inputs für wirtschaftliche Aktivitäten – und damit Ersatz von Primärmaterial
- Verlängerung der Nutzungsdauer sowie Ermöglichung der Wiedernutzung und des Recyclings durch angepasstes Design von Produkt-Dienstleistungssystemen
- Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energien

Bocken et al. (Bocken et al., 2017) kommen zu dem Schluss, dass für den Wandel unserer bisheriger Wirtschaftsweise zu einer zirkulären Wirtschaft vor allem 1) die Durchführung von Fallstudien, 2) Entwicklung von Bewertungsmodellen und damit die Bewertung von ökologischen Vorteilen sowie 3) ein Zusammenspiel von Innovationen auf Industrieebene und politischen Instrumenten/Strategien notwendig sind. Entsprechend von Ansätzen im Bereich der Abfallwirtschaft, die bereits frühzeitig die „R“-Strategien „Reduce, Reuse, Recycle“ postulierten, werden entsprechende Strategien auch bezogen auf die CE beschrieben. Dabei werden die Strategien entsprechend unterschiedlicher Autoren in „3Rs“, „4Rs“, „6Rs“ oder „10Rs“ differenziert (Reike et al., 2018). Auf Produktebene werden die strategischen Ansätze von Potting et al. (Potting et al., 2017) als „10Rs“ dargestellt und entsprechend ihrer Priorität für die CE geordnet. Die Strategie Re-use wird dabei weiter unterteilt. Als wesentliche Schritte für die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten wird dabei auf „Remanufacture“ oder „Repurpose“ (Nutzung von Modulen/Bauteilen eines defekten Produkts in einem neuen Produkt mit gleicher oder geänderter Funktion) und auf „Refurbish“ (Aufarbeitung von defekten Produkten und Weiternutzung) eingegangen.

Laut Cooper and Gutowski (Cooper and Gutowski, 2017) lieferte Lund (1984) eine der ersten Definitionen von Wiederaufarbeitung und beschrieb sie als einen industriellen Prozess, bei dem abgenutzte Produkte durch Dekonstruktion/Demontage des Produkts, Reinigung und Aufarbeitung aller verwendbaren Komponenten und bei Bedarf Wiederausammenbau des Produkts mit neuen Teilen in einen wie neuen Zustand versetzt werden.

Beide Arten der Verlängerung der Lebensdauer von Produkt oder Material bilden eine Form von Re-use ab, die auf eine Reduzierung des Verbrauchs von Ressourcen und Schlüsselmaterialien,

des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung sowie auf die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen im globalen Marktumfeld abzielt (Tolio et al., 2017). Die Produktionsplanung für solche Art der Wiedernutzung weicht dabei allerdings stark von bisherigen, linearen Managementsystemen ab (Guide, 2000). Fallbeispiele im Bereich Re-Use werden von (Cooper and Gutowski, 2017) entsprechend der Bereiche „Bauindustrie und Infrastrukturen“, „Industrielle Anlagen“, „Transport“, „Haushaltsgeräte“, „Papierindustrie“ und „Textilindustrie“ dargestellt. Es zeigt sich vor allem im Bereich des Remanufacturing im Transportbereich/Automotive eine hohe Anzahl von Fallstudien (siehe auch Kern, 2017). Im Bereich der metallverarbeitenden Industrie und im Speziellen der Werkzeugindustrie wurde das Re-manufacturing bisher nicht untersucht. In verschiedenen Fachartikeln werden jedoch die theoretischen Möglichkeiten in Bezug auf die Begriffe „Remanufacture/Repurpose“ und „Re-use“ aufgezeigt, deren Kernaspekte hier nachfolgend beispielhaft anhand von drei Literaturquellen kurz zusammengefasst werden:

*Dunant et al.* (Dunant et al., 2018) beschreiben den Einsatz von Stahlträgern und -bauteilen im Bauingenieurwesen in England. Sie zeigen auf, dass Stahlbauteile in der Gebäudetechnik vergleichsweise simpel wiederverwendet werden können, wenn Gebäudekomplexe nicht zerstörend abgerissen, sondern schichtweise abgetragen werden. Das Material, das in der Arbeit von *Dunant* thematisiert wird, ist unlegierter Baustahl, dessen Kreislaufführung sicherlich richtig und wünschenswert ist, der jedoch in Bezug auf das Anwendungsspektrum und die enthaltenen (kritischen) Legierungselemente weit entfernt ist von dem in diesem Vorhaben adressierten, hochlegierten Werkzeugstahl. Bis auf das grundsätzliche Konzept der Wiederverwendung lassen sich daher zwischen den Arbeiten von *Dunant* und diesem Vorhaben keine Parallelen ziehen.

*Cooper and Allwood* (Cooper and Allwood, 2012) beziehen sich in einem ihrer Artikel auf die maximal möglichen Potentiale, die in der Wiederverwendung (Reuse) von verschiedensten Bauteilen auf Eisen- und Aluminiumbasis enthalten sind. Sie beschreiben die Möglichkeiten und Grenzen dieses Vorgehens anhand von theoretischen Fallstudien und Interviews mit führenden Verarbeitern von Werkstoffen zu Endprodukten. Im Gegensatz zu dem hier beantragten Vorhaben ist diese Arbeit rein theoretisch aufgebaut, ohne das konkrete Anwendung projiziert und praktisch umgesetzt werden.

Remanufacturing wird nach (Kern, 2017) zu zwei Dritteln in der Automobilindustrie eingesetzt und bezeichnet immer die „*Wahrung oder Wiederherstellung der Produktgestalt und der Produkteigenschaften für eine erneute Verwendung*“ (Zitat Rolf Steinhilper, [3] S.17). Mit inbegriffen sind hier die Demontage, Reinigung, Prüfung, Aufarbeitung und Wiedermontage. Auch hier, das heißt im wirtschaftlichen Bereich der Automobilindustrie, setzt das Remanufacturing bei un- oder niedriglegierten metallischen Blechwerkstoffen an. Diese haben, wie bereits zu den Baustählen ausgeführt, den Vorteil, dass sie im Unterschied zu den hier betrachteten Werkzeugstählen keine hohen Gehalte an kritischen Elementen enthalten. Diese Aussage bezieht sich auf die überwiegend verwendeten Stahlsorten im Karosseriebau, also bspw. DP-Stahl, TRIP-Stahl oder Presshärtestahl. Ein Vorteil des Remanufacturing von Karosserieblechen liegt zudem in der Wiederverwendung oder Kaskadennutzung innerhalb eines Unternehmens. Zudem weisen diese Bleche eine gleichmäßige Dicke auf und ihre Fertigungsreste lassen sich innerhalb hoch automatisierter Prozesse vergleichsweise einfach erfassen und einer weiteren Nutzung zuführen. Das beantragte Vorhaben ist in dieser Hinsicht deutlich komplexer und anspruchsvoller.

Alle Veröffentlichungen beschreiben den Einsatz von Bauteilen mit dem gleichen Einsatzbereich und der gleichen Aufgabe auch im zweiten Produktleben oder aber mit dem Remanufacturing für einen Prozess der Wiederherstellung bezogen auf Baugruppen (Flugzeuge, Computer, MRT u.a.). In keiner Literaturstelle wird beschrieben, wie ein defektes/verschlissenes Bauteil genutzt wird, indem der Werkstoff und die Eigenschaften von diesem zum Vorteil eines anderen neuen Bauteils eingesetzt werden kann. Das Gesamtkonzept des Vorhabens wird daher als neuartig und innovativ eingeschätzt.

Ein wesentlicher Punkt innerhalb der Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Circular Economy und im Speziellen von Remanufacturing ist nach wie vor die Entwicklung eines geeigneten Indikatorensets zum einen auf globaler und nationaler Ebene, aber auch auf Unternehmens- und Produktebene. Für eine Bewertung einer CE werden die Methoden 1) Materialflussanalyse, 2) Lebenszyklusanalyse sowie 3) Evaluations- und Monitoring-Indikatoren genutzt (Saidani et al., 2019). Dabei werden die Indikatorensysteme „i) Material flow accounting; ii) eco-efficiency indicators; and iii) hybrid indicators“ genutzt (ebd.). Die Zirkularität wurde mit entsprechenden Indikatoren bereits auf globaler und Länder-Ebene dargestellt, und zwar auf der Basis von Input-Output basierten Materialflussanalysen (Haas et al., 2015; Jacobi et al., 2018; Krausmann et al., 2018). Dabei werden als Indikatoren die Recyclingraten (Anteil an stofflich verwertetem Material) oder der Anteil des recycelten Materials am Gesamtmaterial abgebildet. In diese Betrachtungen fließen bisher allerdings keine Daten zu wiederverwendetem Material bzw. „remanufactured material“ ein.

Auf Produktebene werden lebenszyklusbasierte Analysen angewendet. Lebenszyklusanalysen oder Lifecycle Assessment (LCA) ist eine weit verbreitete Methodik im Rahmen der Umweltanalyse. Die traditionelle LCA-Methodik ist durch ISO-Normen definiert (International Standard Organization, 2010). Als lebenszyklusbasierte Analyse werden über die Methode „Material Input pro Service“ (MIPS) alle aufgewendeten Ressourcen über den Lebenszyklus hinweg kalkuliert (Schmidt-Bleek, 1998, Liedtke et al., 2014). Bei der Anwendung von lebenszyklusweiten Methoden ist es in erster Linie Ziel ökologische und auch ökonomische Auswirkungen der untersuchten Kreisläufe abzubilden. In einem zweiten Schritt müssen die Ansätze zur Kreislaufführung mit linearen Ansätzen oder weiteren zirkulären Ansätzen verglichen werden. Dafür wird in bestehenden Studien der Grad der Zirkularität als Indikator auf der Basis von lebenszyklusweiten Analysen abgeleitet, z.B. auf Basis des Anteiles des enthaltenden rückgeführten Materials bezogen auf das Gesamtmaterial. Dabei werden in der Literatur verschiedene Ansätze diskutiert (Saidani et al. 2019), beispielsweise der Material Circularity indicator (MCI), der den Grad an Zirkularität über eine Skala von 0 bis 1 darstellt (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Die verschiedenen Ansätze und Indikatoren zur Abbildung einer CE variieren sehr stark. Eine Anwendung und Aussagefähigkeit der bestehenden Ansätze im Rahmen dieses Projekts muss geprüft werden. Die Anwendung des MIPS Konzepts zur Ableitung des lebenszyklusweiten Materialaufwands inklusive der „unused extraction“ wurde bisher nicht für die Ableitung von CE-Indikatoren und zur Bewertung des Ressourceneffizienzpotenzials angewendet. Bisher besteht kein einfach übertragbares Modell auf die in diesem Projekt bearbeiteten Re-Manufacturing Lösungen, das eine ökologische und ökonomische vereint. Es erscheint vor diesem Hintergrund dringend erforderlich ein geeignetes Modell zu entwickeln, mit dem eine Bewertung der hier zu entwickelnden Re-Manufacturinglösungen und ferner eine breite Anwendung in anderen Branchen und Regionen erlaubt.

Erkenntnisse aus einschlägigen Vorarbeiten des Forschungspartners an der BUW liegen u.a. aus den Vorhaben RecyTiC (BMBF MatRessource), KorrWearMat (BMBF MatRessource) und zwei aktuellen Anträgen im Rahmen der EFRE.NRW-Leitmarktwettbewerbe vor. Auf einen dieser Anträge wird im Abschnitt 2 nochmals Bezug genommen. Das Wuppertal Institut kann als Forschungspartner auf zahlreiche Vorarbeiten im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung und Ressourceneffizienzanalyse zurückgreifen wie z.B. dem Projekt „STROM“ („Globale Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität“, im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Projektlaufzeit: 10/2011-09/2014) oder dem Projekt „KRESSE“ („Kritische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems“, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektlaufzeit: 02/2012-06/2013). Es liegen darüber hinaus auch Erfahrungen vor in Bezug auf die politische Ebene durch Projekte wie „European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy 2014-2018“ ( im Auftrag der European Environment Agency, Laufzeit: 07/2014-12/2018) oder Ressourcenpolitik („Entwicklung einer gesellschaftlichen und politischen Debatte zur Ressourceneffizienz“, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Laufzeit: 01/2012-06/2015) sowie Erfahrungen mit bei der Einbindung verschiedenster Akteure in die Themen Ressourceneffizienz z.B. durch die Projekte „Ressourceneffizienz in der Wertschöpfungskette durch Unternehmenskooperationen“ (im Auftrag des ESF-Bundesprogramms "Gesellschaftliche Verantwortung im Mittelstand" (CSR-Programm), Laufzeit: 03/2012-12/2014) oder „INNOLAB“ („Living Labs in der Green Economy: Realweltliche Innovationsräume für Nutzerintegration und Nachhaltigkeit - Methoden und Strategien für nachhaltige Produktdienstleistungssysteme“, im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Laufzeit: 03/2015-03/2018).

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die zentrale Aufgabenstellung des Gesamtprojektes lässt sich in folgende wissenschaftliche und technische Teilziele unterteilen:

- Bestandsaufnahme und Konzeption
- Technische Fallbeispiele Remanufacturing und Repurposing mit Rückholprozess erstellen
- Bewertungsmodell zur Bewertung, Skalierung und Übertragbarkeit erstellen
- Ergebnistransfer
- Technologieübertrag und Demonstratoreinsatz

Zur Erreichung dieser Teilziele haben sich die Projektpartner entsprechend ihrer Kompetenzen organisiert. Die Organisationsstruktur des Gesamtprojektes wird folgend dargestellt.

**TKM** als unabhängiges Familienunternehmen fertigt und vertreibt hochwertige Maschinenmesser, Sägen, Raket und Präzisionsverbrauchsgegenstände für technische Anwendungen in einer Vielzahl von Branchen weltweit. Die TKM Group hat ihren Hauptsitz in Remscheid und beteiligt sich kontinuierlich an Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung von Materialien und Fertigungsverfahren. Neben dem Interesse an verlustfreier Fertigung, u.a. im Rahmen des Vorhabens „EffProSchliffUp“, ist TKM auch an weiteren Konzepten einer CE interessiert. Ein großes Potenzial wird im Bergischen Land gesehen durch neuartige Unternehmenskooperationen. Damit erhofft sich TKM zum einen effizienten Rohstoffeinsatz im eigenen Unternehmen sowie die Erschließung eines für uns neuen Markts über die Rückführung

von hochwertigem Sekundärmaterial. Im Vorhaben übernimmt TKM die **Rolle** der Konsortialführung und ist für die Rückführung des Primärprodukts, das Remanufacturing und Weitervermarktung als Sekundärmaterial verantwortlich.

**Wilh. Schmitt & Comp. GmbH & Co. KG (Kirschen):** Seit 1858, über 155 Jahre im Familienbesitz, produziert die Firma Wilh. Schmitt & Comp. GmbH & Co. KG in Remscheid hochwertige Holzbearbeitungswerkzeuge der Marke »KIRSCHEN«. Das große Sortiment wird auch heute noch überwiegend handwerklich gefertigt und ist über den qualifizierten Fachhandel erhältlich. Im Vorhaben übernimmt KIRSCHEN die **Rolle** des Entwicklers eines Demonstrators des Repurposing am Beispiel „Holzbearbeitung“.

**Freund & Cie:** FREUND hat sich auf die Herstellung und den Vertrieb hochwertiger Handwerkzeuge für Dachdecker, Bauklempner, Zimmerer und den Trockenbaumonteur spezialisiert. Bei speziellen Schiefer- und Ziegelbearbeitungswerkzeugen ist FREUND der führende Hersteller weltweit. Das Unternehmen liefert Werkzeuge an das Handwerk ausschließlich über Handelspartner, die durch eine schnelle Lieferbereitschaft, umfassende Beratung in der Anwendung, sowie vielfältige Marketingaktionen unterstützt werden. Im Vorhaben übernimmt FREUND die **Rolle** des Entwicklers eines Demonstrators des Repurposing am Beispiel „Handwerkzeuge“.

**PlanConsult GmbH:** Die Plan Consult GmbH ist als Gründungsmitglied der Plan Consult Mediagonal Gruppe (PCM Gruppe) Lösungsanbieter im Bereich ERP, speziell im Bereich der Logistik und Disposition. Das Unternehmen bietet seinen Kunden aus einer Hand die Optimierung logistischer und dispositiver Prozesse zusammen mit der Abbildung dieser Prozesse im jeweiligen ERP-System des Kunden, über Standardprozesse oder neu konzipierte IT-Prozesse. Im beschriebenen Vorhaben übernimmt PlanConsult die **Rolle** der Anbindung an die ERP-Systeme und Digitalisierung der Prozesse. Hierzu wird eine Methode entwickelt, alle für die Abbildung in der ERP-Landschaft relevanten realen Prozesse zu identifizieren und diese so in der IT-Landschaft zu implementieren, dass der Implementierungsaufwand sowie der anschließende tägliche Bearbeitungsaufwand minimiert werden. Die Methode wird dabei ermöglichen alle auch zukünftigen Anforderungen an Digitalisierung, Datenmenge und -qualität sowie die buchhalterischen und gesetzlichen Vorgaben sicher zu stellen und Anpassungen flexibel und kostengünstig durchzuführen.

**Wuppertal Institut, Forschungsgruppe SCP:** Das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 1991 vom Land NRW im Rahmen gegründet, arbeitet interdisziplinär und problemlösungsorientiert im Themenbereich der angewandten Nachhaltigkeitsforschung. Seine Aufgabe ist die Wahrnehmung einer Mittlerfunktion zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Die Forschungsarbeiten bauen auf disziplinären wissenschaftlichen Erkenntnissen auf und verbinden diese bei der transdisziplinären Bearbeitung komplexer Fragestellungen zu praxisrelevanten und Akteurs bezogenen Lösungsbeiträgen. Die **Abteilung Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren** arbeitet an Strategien zur Entwicklung und Umsetzung nachhaltiger Produktions-Konsum-Systeme. Im Mittelpunkt der Forschung stehen die Ressourcenproduktivitäts- und Nachhaltigkeitsbewertungen von Wertschöpfungsketten, Branchen und Bedarfsfeldern, sowie die Veränderung von Handlungs- und Konsummustern auf Akteursebene, durch zielgruppengerechte Konzepte und Instrumente. Der **Forschungsbereich Kreislaufwirtschaft** untersucht, wie CE mit Blick auf eine optimierte Ressourceneffizienz ausgestaltet werden kann. Zentrale Aktivitäten betreffen die Kreislauffähigkeit von Rohstoffen,

Möglichkeit und Beitrag von Reuse und Reparatur von Produkten zur Einsparung von Ressourcen, Abfallvermeidung sowie Untersuchungen zu Politischen Rahmensetzungen, Geschäftsmodellen, Technologien und Prozesse. Im beschriebenen Vorhaben übernimmt das WI die **Rolle** eines Forschungspartners mit dem Schwerpunkt „Bewertung von Nachhaltigkeit und Ökonomie“.

**Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl FUW:** Der Lehrstuhl für Neue Fertigungstechnologien und Werkstoffe (FUW) wurde 2014 neu eingerichtet und beschäftigt sich mit Forschungsfragen zur Verarbeitung metallischer Werkstoffe. Fachwissenschaftlich werden in Forschung und Lehre, angelehnt an die globalen SDGs, vor allem Fragestellungen zur Energie- und Rohstoffintensität aufgegriffen mit dem Ziel, gemeinsam mit industriellen Partnern neue Lösungen für ressourcenschonende Wertschöpfungen zu entwickeln und in der Praxis zu etablieren. Für die Bearbeitung der Forschungsfragen verfügt der Lehrstuhl über ein voll ausgestattetes Werkstoff-Entwicklungslabor mit Prüf- und Charakterisierungstechnik sowie Software für die Werkstoff-Entwicklung und Materialauswahl. Im beschriebenen Vorhaben übernimmt BUW-FUW die **Rolle** eines Forschungspartners mit dem Schwerpunkt „Werkstoffkunde“.

Das **Konsortium** bringt umfangreiche sowie sich gegenseitig ergänzende Qualifikationen und Kenntnisse zur zielführenden und effizienten Bearbeitung der gestellten Forschungsaufgaben ein. Im Projekt arbeitet ein Konsortium aus wissenschaftlichen Partnern aus verschiedenen Fachbereichen sowie Unternehmen aus verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette eng zusammen. Zusätzlich werden für den Transfer weitere Partner einbezogen, so dass eine Verbreitung der Ergebnisse gewährleistet wird. Die folgenden assoziierte Partner sind bereits über einen LOI eingebunden: Neue Effizienz, Forschungsgemeinschaft Werkzeuge (FGW) Remscheid, Metabolon, Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Effizienz-Agentur NRW.

Zu Beginn des Projekts wurde der IST-Zustand in den beteiligten Unternehmen der Metallverarbeitung aufgenommen und ausgewertet. Dies bezieht Warenwirtschaftssysteme und deren Kompatibilität mit dem geplanten Kennzeichnungs- und Rückverfolgungssystem ein. Zudem wurden Warenströme erfasst und einzelnen Produkten bzw. Produktgruppen zugeordnet. Aus diesen wurden Kandidaten für die Entwicklung von Remanufacturing- und Repurposing-Konzepten identifiziert. Die Unternehmenspartner waren für die IST-Analyse in Ihrem Unternehmen zuständig. Die BUW übernimmt schwerpunktmäßig die Bestimmung der verwendeten Werkstoffe, Fügeverfahren und Wärmebehandlungsprozesse und wurde dabei vom WI unterstützt. Die Plan Consult GmbH wurde hinsichtlich der Aufnahme bestehender Prozesse im ERP-System eingebunden. Zusätzlich wurden Endkunden identifiziert, die sich bereiterklären, verschlissene Messer und Werkzeuge als Grundlage für die Demonstratoren bereitzustellen. Dies erfolgte durch die Industriepartner TKM, Kirschen und Freund über die Identifikation möglicher Endkunden zur Bereitstellung von verschlissenen Material bzw. zur Abnahme neuartiger Produkte. Der Konsortialführer entwickelte zusammen mit den Forschungspartnern WI und BUW auf Grundlage der ermittelten Informationen ein Konzept für das Remanufacturing von Maschinenkreismessern. Die ökonomische Betrachtung, die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, die werkstofftechnische Validierung sowie die Digitalisierung der dazu notwendigen Prozesse wurden ebenfalls bearbeitet. Der Projektpartner TKM konzeptionierten in Zusammenarbeit mit der BUW Remanufacturing-Ansätze, ausgehend von ihren Produktportfolios und setzten diese im Demonstratormaßstab um. Der Konsortialführer sowie die Partner Kirschen und Freund zusammen mit den Forschungspartnern WI und BUW entwickeln

auf Grundlage der ermittelten Informationen Konzepte für das Repurposing metallischer Produkte der beteiligten Partner zu Halbzeugen und Zweit-Produkten. Die ökonomische Betrachtung, die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle wurde durch das WI betrachtet, während die werkstofftechnische Validierung primär Aufgabe der BUW war. Die Digitalisierung der dazu notwendigen Prozesse wurde ebenfalls bearbeitet und war ein Querschnittsthema, an dem alle Verbundpartner beteiligt waren. TKM, Plan Consult sowie die wissenschaftlichen Partner BUW und WI waren für die Einbindung weiterer Akteure sowie Machbarkeitsabschätzungen beteiligt. Es wurde eine digitalisierte Produkt-Kennzeichnung entwickelt, die für die Rückverfolgung der Produkte in der Erst- und Zweitnutzungsphase zwingend erforderlich ist. Daher ist schwerpunktmäßig die Plan Consult für die Konzeptentwicklung in Abstimmung mit dem Konsortialführer TKM zuständig gewesen. Zudem wurde eine Logistikkette für die beteiligten Partner und potentielle Endkunden entwickelt, die in das bestehende ERP-System implementiert werden sollte, beispielsweise über eine neue Identifizierungs-ID und Anpassungsnotwendigkeiten für die Bereiche Vertriebsbeleg und Warenbewegung inkl. Neuanlage geeigneter Retourenprozesse, Anlage Retourmaterialien im Wareneingang und Qualitätssicherung. Ergebnisse aus vorherigen Erkenntnissen wurden zusammengeführt, um eine Methodik der ökologischen und ökonomischen Bewertung zu entwickeln und anzuwenden, in der vor allem die Aspekte von Remanufacturing und Repurposing integriert wurden. Es wurden dabei konkrete Einsparpotentiale berechnet für Ressourcen (über MIPS-Methode), THG (Carbon Footprint) und weitere Umweltkategorien sowie ökonomische Potenziale. Darüber hinaus wurden Remanufacturing und Repurposing im Vergleich zu bisherigen Verwertungsverfahren eingeordnet. Das WI übernahm die Indikatorenidentifikation, die Entwicklung der ökologisches Bewertungsmethodik sowie die Entwicklung der ökonomischen Bewertungsmethodik. Auf Basis der Auswertungen wurde das Gesamtpotenzial des Reuse auf regionaler Ebene bestimmt. Dazu musste zunächst die Übertragbarkeit auf andere Unternehmen und Branchen geprüft werden und in verschiedenen Szenarien das Potenzial der Ressourceneffizienz und der Wertschöpfung abgeleitet werden. Dabei sind auch unterschiedliche Preisentwicklungen berücksichtigt worden, die eine wirtschaftliche Umsetzung einer CE in der metallverarbeitenden Industrie beeinflussten. Weitere Produktgruppen und relevante Stoffströme auf regionaler Ebene wurden identifiziert, die als Hot Spots besonders relevante Markt- und Ressourceneinsparpotentiale aufwiesen. Darüber hinaus wurde die Übertragbarkeit auf andere Wirtschaftszweige und Regionen dargestellt. Das WI übernahm die Entwicklung des Regionalmodells sowie die Szenarienanalyse.

Um die planmäßige Umsetzung des beschriebenen Vorhabens sicherzustellen, wurden im Vorfeld des Projektes sechs Meilensteine formuliert, die nach bestimmten Zeiträumen erreicht werden mussten:

- Erfassung des IST-Zustands sowie die Konzept-Entwicklungen in allen beteiligten Unternehmen (nach 9 Monaten)
- Nachweis von erfolgreichem Re-Manufacturing oder Re-Engineering Prozess anhand eines Demonstrators (nach 24 Monaten)
- Erfolgreiche Entwicklung Produkt-Kennzeichnungs- und Rückverfolgungssystem und Logistik-Kette (nach 30 Monaten)
- Aufzeigen der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen sowie der Übertragbarkeit und Potenziale (nach 33 Monaten)
- Entwicklung von Politikempfehlungen (nach 36 Monaten)

- Entwicklung Factsheets und Transferbroschüre mit Qualifizierungskonzept und Durchführung von Transferworkshops (nach 36 Monaten)

Alle Meilensteile wurden erfüllt, allerdings um ca. fünf Monate verschoben. Die ursprünglich geplante dreijährige Projektlaufzeit wurde für das Projekt kostenneutral um weitere 6 Monate (bis zum 31.12.2022) verlängert. Diese Verlängerung resultierte aus mehreren Gründen: Zum einen wurde durch die weltweite Pandemie, bedingt durch Corona, arbeiten bei den Forschungs- und Industriepartner behindert, sodass Untersuchungen und Arbeiten nicht wie im Meilensteinplan durchgeführt werden konnten. Dadurch wurden die Meilensteine nicht wie geplant eingehalten, konnten aber dennoch erfüllt werden. Seitens der industriellen Partner verschob sich dadurch die Fertigung der Demonstratoren und die metallographischen und werkstoffkundlichen Untersuchungen der Forschungseinrichtung Bergische Universität Wuppertal. Zum anderen konnten seitens der forschenden Partner ausstehende Versuchsergebnisse zur abschließenden Beurteilung der Nachhaltigkeitsbewertung und der Regionalwirtschaftlichen Übertragbarkeit konkreter ausgearbeitet werden.

#### 4 Wesentliche Ergebnisse

*Dieses Kapitel fasst die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammen. Für detaillierte Informationen wird auf Teil 2 dieses Berichts verwiesen.*

Unter dem Aspekt des Remanufacturings wurden bei *TKM* große, verschlissene Kreismesser von den Endkunden zurückgeholt. Mit dem Ziel, daraus neuwertige, kleinere Kreismesser herzustellen, wurden die Messer im ersten Schritt durch trennende Verfahren auf die Zielgröße mit etwas Übermaß gebracht. Die zu erreichende Zielgeometrie wurde durch Schleifen in hochautomatisierten Fertigungszellen hergestellt. Die dafür notwendigen NC-Programme der Schleifmaschinen wurden neu erstellt bzw. in vielen Iterationen weiter optimiert. So gelang es, am Ende der Entwicklung kleinere Kreismesser aus verschlissenen, größeren Kreismesser herzustellen, ohne dass eine erneute, energieintensive Wärmebehandlung notwendig wurde. Die so erneuerten Kreismesser erreichten gleich gute Eigenschaften wie in der konventionellen Fertigung.

Mit dem Ziel des Re-Engineerings bzw. Repurposings wurden kleinere Kreismesser, die für das Remanufacturing nicht in Frage kommen, zu Bestandteilen von Handwerkzeugen umgearbeitet. Exemplarisch seien an dieser Stelle ein Drechselbeitel der Firma *Kirschen* und ein Pappreißmesser für Dachpappen der Firma *Freund* erwähnt. Aus verschlissenen Kreismessern wurde durch Laserschneiden annähernd die Zielgeometrie erzeugt. Wie bei den Kreismessern wurde in einem weiteren Schleifprozess das Fertigteil hergestellt. Neben materialkundlichen Untersuchungen durch die *BUW* wurde auch bestimmt, wie gut die Gebrauchseigenschaften der so hergestellten Werkzeuge im Vergleich zu den konventionellen Werkzeugen sind. Im Ergebnis lässt sich die Nutzungszeit deutlich verlängern. Als nachteilig stellte sich heraus, dass jedoch der Schleifprozess, bedingt durch den Materialwechsel, deutlich aufwendiger wurde.

Wichtig für die Identifizierung von den Kunden zurückgeholten Kreismessern war die Entwicklung eines Kennzeichnungssystems. Die Anforderungen war, dass die Kennzeichnung schon zu Beginn der Fertigungskette aufgebracht werden kann und in den folgenden Produktionsschritten der Wärmebehandlung und des Schleifens nicht zerstört wird. Natürlich soll auch der Einsatz



beim Kunden nicht zur Unkenntlichkeit führen. Als zielführend wurde eine zweidimensionale Kennzeichnung namens Datamatrix-Code angesehen, die mit Hilfe eines Lasers auf die Rohware zu Beginn des Produktionsprozesses aufgebracht wird. Somit kann der Lebenszyklus der Ware innerhalb der Fertigung, aber auch an wichtigen Stationen im Logistikprozess erfasst werden.

Ein weiterer, wichtiger Punkt für den Rückholprozess war die Entwicklung einer Transportmöglichkeit für die gebrauchten, aber dennoch gefährlich scharfen Kreismesser. Es konnte ein wiederverwendbarer Holzbehälter entwickelt werden, der es ermöglicht, die Kreismesser sicher einzulegen, der leicht innerhalb eines Unternehmens mit einem Hubwagen transportiert werden kann und der sicher von einem Logistikunternehmen verladen und transportiert werden kann. Auch die sichere Entnahme der scharfen Kreismesser ist damit möglich.

Im Rahmen des Projektes wurden durch Plan Consult GmbH alle relevanten Prozesse identifiziert, welche im Zusammenhang mit der Kreislaufführung der TKM-Produkte einen Bezug zum ERP-System haben und eine Methode entwickelt diese ganz allgemein bei Produzenten wie TKM im Rahmen eines Durchführungsprojektes im Detail zu erkennen und kostengünstig und zukunftsfähig zu implementieren. Aufgrund der hohen Integration der Prozesse in den marktrelevanten ERP-Systemen sind die betrachteten Prozesse und Prozessänderungen neben dem Schwerpunkt bei der Rückführung auch in den Bereichen Produktion, Verkauf, Versand, Wareneingang der rückgeholt Waren sowie der Bestandsführung und Buchhaltung zu betrachten und beschrieben worden.

Bei der ökologischen Betrachtung des Remanufacturings liegt die Materialeffizienz deutlich höher als in der konventionellen Fertigung. Diese liegt im betrachteten Beispiel zwischen 12,5 % und 40,4 %. Im Durchschnitt können der Carbon Footprint um 65,2 %, der kumulierte Energieaufwand um 64 % und der Material Footprint um 80 % reduziert werden. Der Rückholprozess hat einen erheblichen Einfluss. Der Transport über sehr große Distanzen kann die Einsparungen kompensieren. Der Carbon Footprint für das Remanufacturing wäre dann höher als für die konventionelle Fertigung.

Bei der ökologischen Analyse des Repurposings stellte sich heraus, dass der Carbon Footprint (CF) für die Herstellung eines 611er Maschinenkreismessers im linearen und zirkulären Szenario ähnlich ist. Für den Drechselbeitel beträgt der CF im linearen Szenario 1,3 kg CO<sub>2</sub> eq und im zirkulären Szenario zwischen 0,62 kg CO<sub>2</sub> eq und 1,28 kg CO<sub>2</sub> eq., je nach Dauer des Schleifprozesses, welcher damit ein wesentlicher Faktor für die ökologische Performance des zirkulären Produkts ist. Durch das CE-Konzept Repurposing kann eine ökologische Einsparung von etwa 15 % erzielt werden. Die legierungsspezifische Nachhaltigkeitsbewertung von Stahl zeigte unterschiedliche Ergebnisse für verschiedene Stahlsorten. Die ganzheitliche Bewertung von Stahl erfordert die Berücksichtigung verschiedener Indikatoren auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene.

Die ökonomische Bewertung des Remanufacturings ergibt, dass Kreismesser, die auf dem Landweg zurückgeführt werden und durch Laserschneiden trennend bearbeitet werden, die niedrigsten Selbstkosten aufweisen. Die Wiederverwendung des Rohmaterials reduziert die Kosten auf 8,1 % der ursprünglichen Kosten. Die Verarbeitungskosten des Halbzeugs sinken um 32,5%. Die Transportkosten sind höher, können aber durch andere Kostenblöcke kompensiert

werden. Das Remanufacturing ist wirtschaftlich rentabel, senkt die Selbstkosten um 29 – 52 % und ermöglicht höhere Gewinnmargen oder niedrigere Produktpreise.

Beim Repurposing zeigt die wirtschaftliche Analyse, dass die Kosten für die Klingen für die weiterverarbeitenden Projektpartner zu hoch liegen. Hinzu kommt noch der gesteigerte Aufwand bei den Schleifprozessen. Die Produktion von Halbzeug ist nicht rentabel, da die Kosten die Einkaufspreise weit übersteigen. Optimierungspotential ist denkbar in der Ausbeute, also in der Anzahl der ausgeschnittenen Teile aus dem Kreismesser, und bei den Transportkosten.

Die regionalwirtschaftliche Übertragbarkeit wurde eingehend untersucht. Es wurden die Bedingungen ermittelt und erläutert, die grundsätzlich für eine Übertragbarkeit gegeben sein müssen. Weiterhin wurden die Faktoren der ökologischen, ökonomischen und technischen Machbarkeit erarbeitet und beschrieben. Verschiedene Analysen zeigen die Potentiale der industriellen Symbiose.

Zum Thema Politikempfehlungen wird zunächst auf schon bestehende Politikinstrumente eingegangen. Hier wird auf die politische Anerkennung der Circular Economy auf globaler, europäischer und deutscher Ebene als Beitrag zur Erreichung der Klimaziele eingegangen. Auf globaler Ebene spielen die Sustainable Development Goals (SDGs) eine Rolle. Auf europäischer Ebene gibt es den Circular Economy Action Plan im Rahmen des European Green Deals, während auf deutscher Ebene das Kreislaufwirtschaftsgesetz und das Ressourceneffizienzprogramm relevant sind. Die Politik zielt darauf ab, Barrieren zu verringern und die Verbreitung der Kreislaufwirtschaft zu fördern. Des Weiteren werden verschiedene Anreizsysteme für die CE vorgestellt und erörtert. Es wird auf die Themen Förderprogramme, Klimaschutzverträge, Steuerungs- und Monitoringsysteme, Ressourcenbesteuerung, Steuervergünstigungen und digitale Produktpässe näher eingegangen.

Die erarbeiteten Ergebnisse dieses Forschungsvorhaben wurden in verschiedenen Formen wie Vorträge, Artikeln, Zeitungsinterviews und Fernsehbeiträgen vorgestellt.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Projekt wurde entsprechend des Antrags ausschließlich durch die Kooperationspartner innerhalb des Projektverbunds bearbeitet. Zum fachlichen Austausch innerhalb der Arbeitsgruppen (AG) und zur Bewertung von Zwischenergebnissen im laufenden Vorhaben wurden regelmäßige Zwischentreffen durchgeführt, an denen alle beteiligten Projektverantwortlichen anwesend waren. In Einzelfällen mussten zur Durchführung bestimmter experimenteller Untersuchungen auf Anlagen bzw. Prüfeinrichtungen externer Arbeitsgruppen zurückgegriffen werden. Auch der Einsatz von Demonstratoren wurde in Kooperation mit externen Industrieunternehmen realisiert. Zu den externen Arbeitsgruppen bzw. Unternehmen gehören:

AG Prof. Dr.-Ing. Friederike Deuerler  
Lehrstuhl Werkstofftechnik (LWT), Bergische Universität Wuppertal

AG Bernd Reibold  
HBR Schneidtechnologie GmbH & Co.KG  
Holz 44 – 42857 Remscheid

AG Hans Mensler

HANS MENSLER Blechverarbeitung GmbH  
Dönhoffstraße 8 – 42655 Solingen

AG Dr. Frank Zobel

FGW Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e. V.  
Papenberger Str. 49 – 42859 Remscheid

AG Prof. Dr.-Ing. habil. Sebastian Weber

Ruhr Universität Bochum – Institut für Werkstoffe - Lehrstuhl Werkstofftechnik  
Universitätsstraße 150 – 44780 Bochum

AG Holger Bahns

BURGVOGEL Cutlery GmbH  
Burger Landstraße 60 – 42659 Solingen