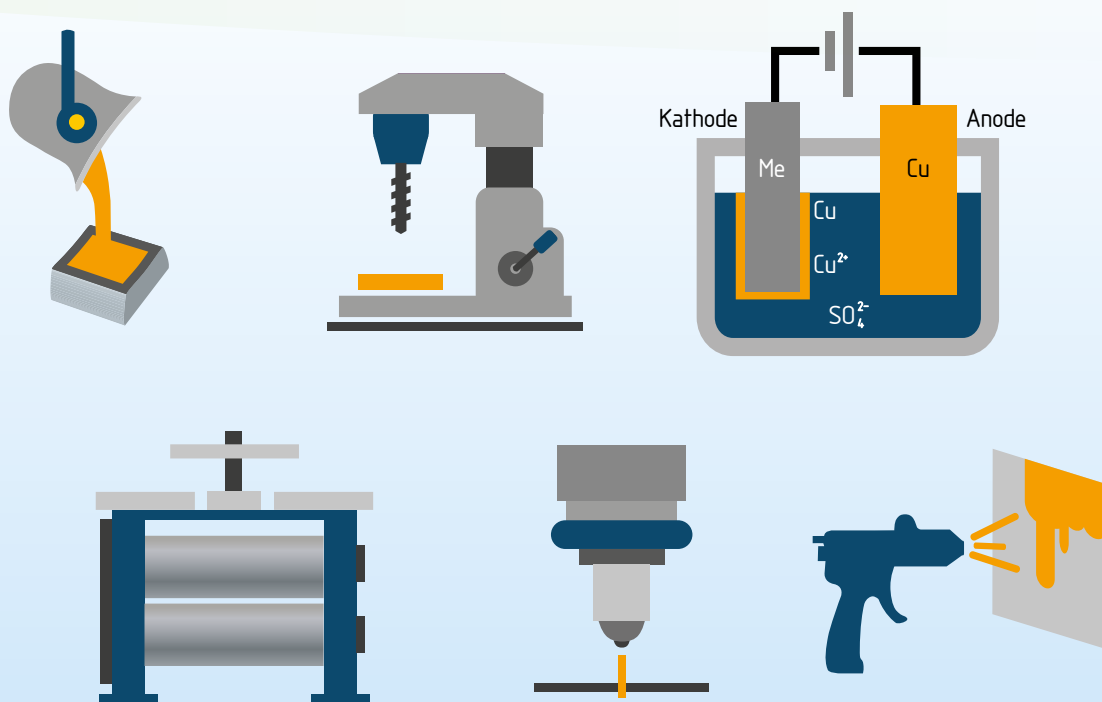




Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe

April 2015



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Fraunhofer
IPA



HESSEN
Hessisches
Ministerium für
Wirtschaft, Energie,
Verkehr und
Landesentwicklung

Studie:

Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz
im verarbeitenden Gewerbe

Erstellt von:

Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart

Autoren:

Elisabeth Dückert
Lorenz Schäfer
Ralph Schneider
Sylvia Wahren

Wir danken Herrn Prof. Dr.-Ing. Brüggemann
(Institut für Produktionstechnik,
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften)
für die fachliche Unterstützung
bei der Entstehung dieser Studie.

Fachliche Ansprechpartner:

Dr. Christof Oberender
Manuel Weber

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin

Tel. +49 30 27 59 506 0

Fax +49 30 27 59 506 30

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: Anna Morich

Satz und Gestaltung: Anna Morich

Studie

Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz
im verarbeitenden Gewerbe

INHALTSVERZEICHNIS

MANAGEMENT SUMMARY	10
1 HINTERGRUND UND MOTIVATION DER STUDIE	12
1.1 Zielsetzung	13
1.2 Natürliche Ressourcen und Ressourceneffizienz	15
2 VORGEHENSWEISE DER UNTERSUCHUNG	18
2.1 Berücksichtigte Berichts- und Datenquellen	18
2.2 Entwicklung des Analysekonzepts	19
2.2.1 Identifizierung relevanter Projektberichte	20
2.2.2 Detailanalyse – Maßnahmencharakterisierung	25
2.2.3 Detailanalyse – Nutzendarstellung	26
2.2.4 Konzept zur Verdichtung und Auswertung der Daten	27
3 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG	31
3.1 Auswertung der Projektdokumentation zu Fertigungsverfahren des Urformens	31
3.1.1 Ressourceneffizienz bei Fertigungsverfahren des Urformens	32
3.1.2 Ressourceneffizienz beim Aufschmelzen von Metallen und im Metallguss	34
3.1.3 Ressourceneffizienz bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi	47
3.2 Auswertung der Projektdokumentation zu Fertigungsverfahren des Umformens	58
3.3 Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe des Trennens	68
3.4 Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe des Fügens	78
3.5 Oberflächenbehandlung / Beschichten	86

3.5.1	Ansatzpunkte zur Senkung der Ressourcenbeanspruchung in der Oberflächentechnik	87
3.5.2	Maßnahmen im Prozess Lackieren	88
3.5.3	Maßnahmen im Bereich des Galvanisierens	99
3.6	Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe Stoffeigenschaften ändern	116
3.7	Auswertung der Projektdokumentation zu verfahrenstechnischen Prozessen	120
3.7.1	Betrachtete verfahrenstechnische Prozesse	121
3.7.2	Ressourceneffizienzmaßnahmen bei verfahrenstechnischen Prozessen	123
3.8	Auswertung der Projektdokumentation zur Organisation	159
4	VORSCHLAG ZUR VERBESSERUNG DER DATENGRUNDLAGE DURCH DIE PROJEKTDOKUMENTATIONEN	167
4.1	Bewertung bestehender Projektdokumentationen	167
4.2	Anforderungen an die Projektdokumentation	172
5	ZUSAMMENFASSUNG	185
6	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	188
7	ANHANG I – VORSCHLAG FÜR PROJEKTBERICHTSBLATT	195

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Unterteilung der natürlichen Ressourcen nach Entwurf VDI Richtlinie 4800	16
Abbildung 2:	Grobablauf der Analyse und Auswertung	20
Abbildung 3:	Übersicht zur Anzahl der Berichte in der tiefergehenden Analyse	23
Abbildung 4:	Übersicht zu den Ausschlussgründen von Projektberichten	24
Abbildung 5:	Anzahl der Projektberichte in der Detailanalyse nach Themenkategorie	24
Abbildung 6:	Abstraktes Prozessbild des Urformens	33
Abbildung 7:	Darstellung des Aufwands und Nutzens ausgewählter Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenbedarfs im Metallguss	37
Abbildung 8:	Darstellung des Aufwands und Nutzens ausgewählter Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenbedarfs beim Urformen von Produkten aus Kunststoffen und Gummi	50
Abbildung 9:	Abstraktes Prozessbild des Umformens	58
Abbildung 10:	Bewertung des Nutzens und Aufwands ausgewählter Maßnahmen im Bereich des Umformens	61
Abbildung 11:	Abstraktes Prozessschaubild des Trennens	70
Abbildung 12:	Abstraktes Prozessschaubild zum Fügen	79
Abbildung 13:	Bewertung des Nutzens und Aufwands ausgewählter Maßnahmen im Bereich des Fügens	82

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Quellen der Projektberichte in der Analyse	19
Tabelle 2:	Thematische Kategorisierung der Berichte gemäß Cleaner Production Germany	21
Tabelle 3:	Maßnahmen im Prozess des Metallgusses und der Prozessperipherie	40
Tabelle 4:	Maßnahmen bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi	52
Tabelle 5:	Maßnahmen bei umformtechnischen Verfahren	64
Tabelle 6:	Maßnahmen für die Verfahrenshauptgruppe Trennen	74
Tabelle 7:	Maßnahmen für die Verfahrenshauptgruppe Fügen	84
Tabelle 8:	Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie	90
Tabelle 9:	Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie	101
Tabelle 10:	Maßnahmen bei der Wärmebehandlung	118
Tabelle 11:	Betrachtete verfahrenstechnische Prozesse kategorisiert nach Branchen und Anwendungsfelder	122
Tabelle 12:	Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung organischer Grundchemikalien	127
Tabelle 13:	Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien	131
Tabelle 14:	Ressourceneffizienzmaßnahmen bei Raffinerien	138

Tabelle 15: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Papierherstellung	143
Tabelle 16: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Textilherstellung/Textilverarbeitung	148
Tabelle 17: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Metallindustrie	153
Tabelle 18: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Organisation	162
Tabelle 19: Anforderungen an die Projektdokumentation – Allgemeine Unternehmensdaten	175
Tabelle 20: Anforderungen an die Projektdokumentation – Projektcharakterisierung	176
Tabelle 21: Anforderungen an die Projektdokumentation – Beschreibung der Effizienzmaßnahme	178
Tabelle 22: Anforderungen an die Projektdokumentation – Quantifizierung der erreichten Ressourceneffizienz	182

MANAGEMENT SUMMARY

Natürliche Ressourcen effizienter zu nutzen, schont nicht nur die Umwelt sondern bietet Unternehmen auch die Möglichkeit ihre Kosten deutlich zu senken.

Im verarbeitenden Gewerbe stellen die Materialaufwendungen, also Material und Handelsware, mit einem Anteil von durchschnittlich ca. 57% des Gesamtumsatzes¹ die größte Kostenposition dar. Eine verbesserte Ressourceneffizienz hilft daher die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu steigern und die Kostenrisiken aufgrund der Verknappung von Rohstoffen zu senken.

Obwohl viele – insbesondere große – Unternehmen sich bereits der Möglichkeiten der Ressourceneffizienz annehmen, sind existierende Potenziale der Ressourceneffizienz bisher bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. In vielen Fertigungsbereichen werden neue Ansätze und Ideen zu Effizienzmaßnahmen benötigt. Seit langem unterstützen Förderprogramme und -projekte die Erforschung und praxisnahe Erprobung von technischen aber auch von organisatorischen Lösungen, um natürliche Ressourcen in der Produktion effizienter nutzen zu können. In Summe liegt daher eine Vielzahl von Projektberichten vor, die erfolgreiche Technologieentwicklungen und Maßnahmen sowie daraus resultierende Einsparungen dokumentieren.

Die vorliegende Studie hat diese Berichte zu geförderten Ressourceneffizienzprojekten verschiedener Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene zusammengetragen und diese auf Technologien und Maßnahmen sowie auf verfügbare quantitative Daten zur erzielten Ressourceneffizienz untersucht. Ziel war es, eine Übersicht zu durchgeführten Ressourceneffizienzmaßnahmen im verarbeitenden Gewerbe zu schaffen und auf Basis der Daten, die Möglichkeit einer Ableitung von Benchmarks zu betrachten. Insgesamt wurden 3.600 Berichte einer Grobanalyse unterzogen, von denen 290 in eine Detailanalyse eingingen.

¹ Destatis (2013)

Im Ergebnis liegt ein umfangreicher Katalog zu erfolgreichen Effizienzmaßnahmen für verschiedene Fertigungsverfahren, insbesondere zu Prozessen und Verfahren im Urformen (bspw. Metallguss, Kunststoffspritzguss), Umformen (bspw. Kalt- und Warmumformung), Trennen, Fügen, Beschichten (Galvanisieren und Lackieren) und Stoffeigenschaften ändern sowie zu chemischen Verfahren vor. Weitere Maßnahmen werden in der Produktionsperipherie, bspw. bei der Aufbereitung von Betriebsstoffen, und im indirekten Umfeld bspw. bei Lagerung und Umgang mit Produktionsmaterial aufgezeigt. Diese Sammlung soll interessierten Unternehmen als Impuls dienen, konkrete Möglichkeiten der Ressourceneffizienz auszuloten und vergleichbare Projekte anzustoßen.

Um künftig belastbare quantitative Daten aus den Projektberichten zu gewinnen und Unternehmen Benchmarks zur Ressourceneffizienz an die Hand zu geben, wurde zudem ein Vorschlag für eine entsprechende Dokumentation öffentlich geförderter Forschungs- und Entwicklungs- sowie Beratungsprojekten mit dem Ziel der Steigerung der Ressourceneffizienz erarbeitet. Diese soll den Fördermittelgebern und den Unternehmen eine transparente Ermittlung des Nutzens aus Unternehmenssicht (erreichte Ressourceneinsparung) und der hierzu erforderlichen unternehmerischen Aufwendungen (Investitionen) ermöglichen und kann ein Benchmarking positiv unterstützen.

1 HINTERGRUND UND MOTIVATION DER STUDIE

Mit der wachsenden Weltbevölkerung steigt der weltweite Bedarf an Produkten und mit ihm der Verbrauch an natürlichen Ressourcen. Dem effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen kommt angesichts dieser Entwicklungen ein hoher Stellenwert zu. Natürliche Ressourcen sind wichtige Produktionsfaktoren. Rohstoffe wie metallische und nichtmetallische Mineralien, Öl oder Kohle aber auch Wasser, Luft, Boden/ Fläche und biologische Vielfalt sind für unsere Wirtschaft unverzichtbar. Sie bilden die Grundlage unseres Wohlstands – aber sie sind auch endlich.

Industrien des verarbeitenden Gewerbes sind hierbei besonders ressourcenintensiv. Durchschnittlich ca. 57% des Gesamtumsatzes entfallen für Materialaufwendungen, also für Material und Handelsware². Den Verbrauch an natürlichen Ressourcen zu reduzieren, bedeutet daher nicht nur die Umwelt zu entlasten sondern bietet auch die Möglichkeit, die Kosten maßgeblich zu senken. Die weltweit steigende Nachfrage nach natürlichen Ressourcen macht es zudem notwendig, nach alternativen Lösungen zu suchen, um die Versorgungssicherheit in einem – bezogen auf Technologierohstoffe – rohstoffarmen Land wie Deutschland zu gewährleisten. Die Ressourceneffizienz ist ein wichtiger Baustein, diesen Herausforderungen zu begegnen.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene wurden daher Initiativen ins Leben gerufen, um das Bewusstsein für die Notwendigkeit einer effizienteren Nutzung von natürlichen Ressourcen zu stärken und zu fördern. Durch die Leitinitiative „Ressourcenschonendes Europa“ und den „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ hat die Europäische Kommission sowie das europäische Parlament, das Thema Ressourceneffizienz zu einem Bestandteil der europäischen Umwelt- und Wirtschaftspolitik gemacht.

Mit dem „Deutschen Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess) der Bundesregierung hat Deutschland 2012 ein strategisches Programm zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschlossen. Neben dem Ausbau der Kreislaufwirtschaft, der Sicherung der

² Destatis (2013)

Rohstoffversorgung und der ressourceneffizienteren Gestaltung des Konsums liegt auch hier ein Fokus auf der Ressourceneffizienz in der Produktion.

Auf Bundes- als auch auf Landesebene existieren hingegen schon seit längerer Zeit Programme und Initiativen, die Projekte für eine Verminderung der Umweltbelastung und zur effizienten Nutzung natürlicher Ressourcen unterstützen. Beispielhaft sind zu nennen: Das Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), go-effizient des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) auf Bundesebene, Förderungen der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, des Netzwerks produktionsintegrierter Umweltschutz PIUS mit Kooperationspartnern in verschiedenen Bundesländern.

Mittlerweile liegt daher eine Vielzahl an einzelnen Berichten zu Ressourceneffizienzprojekten vor. Sie dokumentieren ein breites Spektrum an Maßnahmen und stellen damit eine umfangreiche Wissensbasis dar. Daneben weisen die Projektberichte quantifizierte Erfolge aber auch Schwierigkeiten und Rahmenbedingungen von Ressourceneffizienzprojekten aus. Bisher wurden diese Berichte meist nur vereinzelt oder unter starkem Branchenfokus ausgewertet. Es lag daher nahe, die Projektberichte in der Gesamtschau zu betrachten und die Ergebnisse aufzuarbeiten.

1.1 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund initiierte die VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung die vorliegende Studie mit vier Zielen:

1. Analysekonzept

Zunächst sollte ein Konzept entwickelt werden, das eine segmentierte Betrachtung von Prozessen in Produktionsabläufen ermöglicht. Hierzu waren sinnvolle Bereiche bzw. Teil-Prozesse in der innerbetrieblichen Wertschöpfungskette abzugrenzen, für die nachfolgend quantitative Benchmarks für den Verbrauch

verschiedene Ressourcen abgeleitet werden können. Zudem musste es das Konzept ermöglichen, vom Branchenbezug zu abstrahieren und zu prozess- bzw. verfahrensbezogenen Aussagen zu gelangen, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erlauben.

2. Strukturierte Daten

Mithilfe dieses Konzepts galt es dann eine umfassende Analyse von Projektberichten aus verschiedenen Quellen durchzuführen. Außer den in den Berichten enthaltenen Sekundärdaten sollten hierbei keine weiteren Primärdaten erhoben werden. Insbesondere sollten vorhandene Verbrauchsdaten zu Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie zu Energieverbräuchen notiert und die zugehörigen Fertigungsverfahren und Teilprozesse vermerkt werden. Da für die Steigerung der Energieeffizienz im verarbeitenden Gewerbe bereits viele unterschiedliche Handlungshilfen vorliegen, sollte der Schwerpunkt der Analyse Projektberichten gelten, die sich hauptsächlich der Steigerung der Materialeffizienz widmen. Projekte, die ausschließlich das Ziel der Steigerung der Energieeffizienz bzw. der Reduktion des Energieverbrauchs zum Ziel hatten, sollten nicht betrachtet werden.

3. Maßnahmandarstellung

Die erfassten Rohdaten aus den Projektberichten sollten schließlich so verdichtet werden, dass quantitative Benchmarks für die zuvor definierten Fertigungsverfahren und Teilprozesse abgeleitet werden können. Diese Referenzwerte sollten Unternehmen dabei unterstützen, ihre eigene Ressourceneffizienz einschätzen zu können bzw. das Potenzial insbesondere in Bezug zur Materialeffizienz für identifizierte Produktionsabläufe aufzuzeigen. Im Laufe der Untersuchung kristallisierte sich allerdings heraus, dass die Daten der verfügbaren Berichte³ nicht ausreichten, um seriöse Benchmarks abzuleiten. Statt der Benchmarks wurden daher auf Basis der Projektberichte, Problem-/Handlungsbereiche und typische Maßnahmen (bspw. auf Ebene

³ Viele potentielle Projektberichte wurden aus der Untersuchung bspw. aufgrund von irrelevantem Themenfokus, geringer Praxisrelevanz ausgeschlossen (siehe Kapitel 2.2.1 Identifizierung relevanter Projektberichte). Zudem enthielten nicht alle Projektberichte quantifizierte Daten zur Einsparung von Ressourcen, so dass die Datenbasis nicht ausreichte, seriöse Benchmarks abzuleiten.

der Fertigungsverfahren, der Organisation) zusammengetragen und dargestellt.

4. Anforderungen an Projektdokumentationen

Qualifizierte Benchmarks mit Bezug zum Nutzen können sinnvoll durch eine vereinheitlichte und vollständige Dokumentation eingesetzter Ressourcen und erzielter Einsparungen unterstützt werden. Daher wurde hier vereinbart, dass Vorschläge für eine Verbesserung der Datengrundlage im Sinne von Anforderungen an eine Projektdokumentation erarbeitet werden.

1.2 Natürliche Ressourcen und Ressourceneffizienz

Da die Begriffe der „natürlichen Ressourcen“ sowie der „Ressourceneffizienz“ mitunter sehr vieldeutig verwendet werden, soll der Studie an dieser Stelle eine kurze Erläuterung der Begrifflichkeiten vorangestellt werden. Dies soll helfen den Fokus der Studie einzugrenzen und zum besseren Verständnis der Inhalte beitragen.

Der Erklärung des Umweltbundesamts zufolge sind „Natürliche Ressourcen [...] alle Bestandteile der Natur, die für den Menschen einen Nutzen stiften, sei es direkt durch ihren Ge- oder Verbrauch oder indirekt als Einsatzstoffe bei der Produktion von Sachgütern und Dienstleistungen [...]“. ⁴

Im engeren Sinne werden unter natürlichen Ressourcen damit zunächst biotische und abiotische Rohstoffe verstanden, die für industrielle Zwecke aufgrund ihrer stofflichen oder energetischen Eigenschaften der natürlichen Umwelt entnommen werden. Biotische Rohstoffe sind erneuerbare Rohstoffe tierischer oder pflanzlicher Herkunft. Abiotische Rohstoffe sind dagegen nicht erneuerbare Rohstoffe. Zu ihnen zählen Energieträger, Erze und sonstige mineralische Rohstoffe (Baumineralien wie Sand, Kies, Steine sowie Industriemineralien wie Quarzsand, Kalisalze etc). Weiterhin zählen zu den natürlichen Ressourcen im engeren Sinne Wasser sowie der Boden. ⁵

⁴ Umweltbundesamt (UBA) (2002)

⁵ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (2008)

Im weiteren Sinne zählen zu den natürlichen Ressourcen aber auch alle Leistungen, die die Natur in indirekter Weise für den Menschen erbringt. Hierzu zählen beispielsweise der Schutz vor schädlicher Strahlung durch die Atmosphäre, die Aufnahmefähigkeit für Emissionen (Senkefunktion) sowie globale Stoffkreisläufe, die Regenerationsfähigkeit natürlicher Lebensräume und die Biodiversität.⁶

Eine systematische Erarbeitung des Ressourcenbegriffs hat auch der VDI mit seinem Entwurf zur Richtlinie VDI 4800 „Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien“ vorgelegt, die sich im Kern auf die obigen Definitionen stützt. Folgende Abbildung gibt eine Übersicht, welche spezifischen Ressourcen zu den natürlichen Ressourcen gezählt werden.

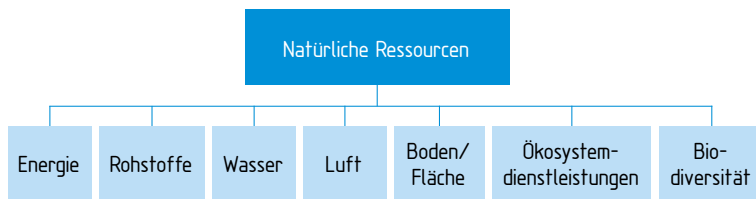


Abbildung 1: Unterteilung der natürlichen Ressourcen nach Entwurf VDI Richtlinie 4800 (2014)

In diesem Kontext wird Ressourceneffizienz als das „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz“ verstanden.⁷ Die Ressourceneffizienz lässt sich dabei über den in der nachfolgenden Formel dargestellten Quotienten berechnen.⁸

$$\text{Ressourcen-} \quad \text{effizienz} = \frac{\text{Nutzen (z.B. Produkt)}}{\text{Aufwand (Einsatz natürlicher Ressourcen)}}$$

Demzufolge lässt sich die Ressourceneffizienz steigern, je geringer der nötige Aufwand an natürlichen Ressourcen oder je höher der erreichte Nutzen (z.B. des Produktes) ist.

⁶ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (2008)

⁷ Kosmol, J.; Kanthak, J. (2012), S. 23

⁸ VDI (2014), S. 7

Die vorliegende Studie wird sich weitgehend auf die Betrachtung der natürlichen Ressourcen „Rohstoffe“ (Produktionsmaterial, Energie, Hilfs- und Betriebsstoffe) sowie „Wasser“ und „Luft“ (insbesondere im Sinne der Senkefunktion bzgl. Abluft, Abwasser) beschränken. Dies ist zum einen in den dieser Untersuchung zugrunde gelegten Projektberichten begründet, zum anderen sind dies aber auch die (natürlichen) Ressourcen, die direkt und unter ökonomischen Gesichtspunkten auf kürzere Sicht in der Produktion beeinflusst werden können.

2 VORGEHENSWEISE DER UNTERSUCHUNG

Grundsätzlich handelt es sich bei der vorliegenden Untersuchung methodisch um eine Sekundäranalyse. Hierbei werden Daten genutzt, die in anderen Arbeiten bereits erhoben bzw. präsentiert wurden, mit dem Ziele neue Fragestellungen mithilfe der Daten zu beantworten.

2.1 Berücksichtigte Berichts- und Datenquellen

Als Datenquellen sollten in dieser Untersuchung Projektdokumentationen, -berichte und -veröffentlichungen herangezogen werden, die in Folge von geförderten Ressourceneffizienzprojekten erstellt und zugänglich gemacht wurden. Insbesondere sollten die verfügbaren Projektberichte aus folgenden Quellen in der Analyse berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Quellen der Projektberichte in der Analyse

Quelle	Kurzbeschreibung (Institution und Inhalte)
Cleaner Production Germany	Informationsportal des Umweltbundesamtes zum Umwelttechnologie-transfer. Das Portal bietet u.a. eine umfangreiche Sammlung von Projektberichten und Publikationen im Bereich umweltverträglicher Verfahren / Umwelttechnik. Alle Projekte wurden durch Bundes- und Länderministerien, Länderagenturen oder durch Stiftungen im öffentlichen Auftrag gefördert.
UIP (Umwelt-innovationsprogramm)	Das Programm des BMU (in Zusammenarbeit mit UBA und der KfW Bank) fördert Investitionen mit Demonstrationscharakter zur Verminderung von Umweltbelastungen in verschiedensten Bereichen. Über die Webseite und das Archiv sind zahlreiche Projektberichte erhältlich.
PIUS (Produktions-integrierter Umweltschutz)	Internetportal des Kooperationsprojekts der Länder Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz sowie des VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Projektberichte und Studien zu den Themen Management, Technologie, Effizienz und Nachhaltigkeit.
Landesprogramme zur Ressourceneffizienz in Baden-Württemberg	Projektberichte der Programme BEST (Betriebliches Energie- und Stoffstrommanagement) und des UPS (Umweltpolitischer Schwerpunkt) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW).
VDI Zentrum Ressourceneffizienz	Das Kompetenzzentrum Ressourceneffizienz ist ein Projekt im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums. Die Webseite bietet Studien, Kurzanalysen und Fallbeispiele zu effizienterem Verbrauch von Material und Energie.
BREF-/BVT-Dokumente	Dokumente und Merkblätter der Europäischen Kommission zu den „Besten Verfügbaren Techniken“ in der Herstellung verschiedener Erzeugnisse (bspw. Eisen- und Stahlerzeugung).
Deutsche Material-effizienzagentur (demea)	Die demea ist eine Initiative des BMWi zur Förderung (Innovations-gutscheine) von KMU bei Projekten im Bereich der Rohstoff und Materialeffizienz.

In der Gesamtzahl lagen aus diesen Quellen etwa 3.600 Berichte für die Untersuchung vor.

2.2 Entwicklung des Analysekonzepts

Die Analyse und Auswertung der Projektberichte wurde in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurde zunächst eine Grobanalyse der Projektberichte durchgeführt, mit dem Ziel jene Berichte zu identifizieren, die in den Bereich des verarbeitenden Gewerbes fallen und geeignete Daten für die spätere qualitative sowie quantitative Auswertung beinhalten.

Im zweiten Schritt wurden die verbleibenden Projektberichte einer Detailanalyse unterzogen. Dies umfasste die Dokumentation von durchgeführten Maßnahmen zur Ressourceneffizienz

als auch die Extraktion von vorhandenen Daten zur Nutzenbewertung der Maßnahmen.

Im dritten Schritt wurden sowohl die qualitativen als auch die quantitativen Daten anhand der Bereiche Produktion sowie Organisation zusammengefasst und für den Bereich der Produktion differenziert nach verschiedenen Ebenen ausgewertet. Abbildung 2 zeigt schematisch den Grobablauf der Analyse und Auswertung.

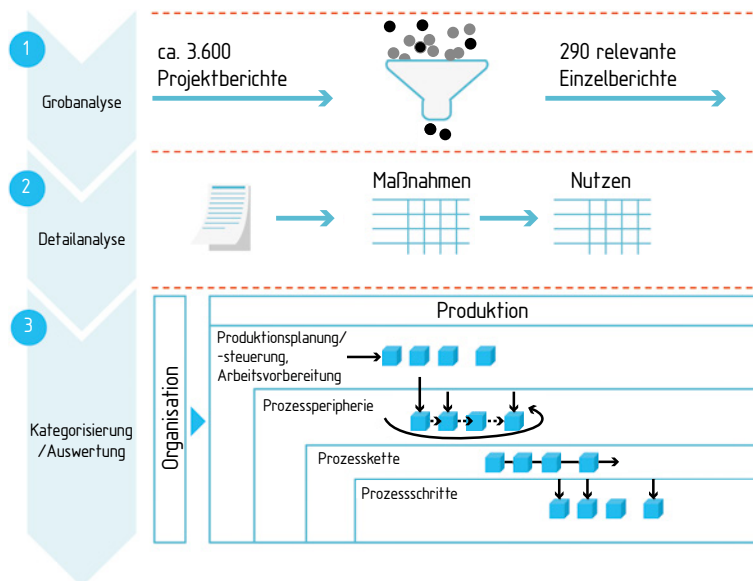


Abbildung 2: Grobablauf der Analyse und Auswertung (Eigene Darstellung)

Die Inhalte der einzelnen Arbeitsschritte werden im Folgenden genauer dargestellt.

2.2.1 Identifizierung relevanter Projektberichte

Zu Beginn der Grobanalyse wurden zunächst alle Projektberichte durch Grunddaten in einer Tabelle erfasst. Diese Daten beinhalten den Projekttitel, den Projektjahrgang, Quellenangaben, die fördernde Institution, die fördernehmende Firma bzw. Organisation sofern verfügbar mit Name und Standort. Aufgrund der Zielsetzung, die verfügbaren Daten auf Prozessebene zu verdichten,

wurde auf eine Einteilung der Projektberichte nach Branchen bzw. Wirtschaftszweigen verzichtet und lediglich eine Zuordnung anhand von Themenkategorien vorgenommen. Da die Datenbank der Cleaner Production Germany, die mit Abstand größte Anzahl an Projektberichten bereithielt, wurde auf deren Kategorisierung zurückgegriffen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Thematische Kategorisierung der Berichte gemäß Cleaner Production Germany

lfd. Nr.	Themenkategorie	lfd. Nr.	Themenkategorie
1	Abfalltechnik	14	Lärmminderung
2	Abwassertechnik	15	Lebensmittel
3	Bauen & Gebäude	16	Luftreinhaltung
4	Biotechnologie	17	Metall
5	Chemie	18	Oberflächentechnik
6	Drucktechnik	19	Papier & Zellstoff
7	Elektro & Elektronik	20	Regenerative Energien
8	Energietechnik	21	Sanierungstechnik
9	Fahrzeuge & Verkehr	22	Steine & Erden
10	Holz & Möbel	23	Textil & Bekleidung
11	Klimaanpassung	24	Trinkwasser
12	Kunststoffe	25	Wassermanagement
13	Landwirtschaft		

Bei der Erfassung der Grunddaten wurde jeder Projektbericht grob analysiert und anhand folgender Kriterien entschieden, ob der jeweilige Bericht in die tiefergehende Analyse einbezogen werden sollte. Wurde eines der folgenden fünf Kriterien nicht erfüllt, wurde der entsprechende Bericht von einer weiteren Untersuchung ausgeschlossen:

1. Relevanter Themenfokus: Unter diesem Kriterium wurde überprüft, ob der Bericht ein Projekt im Bereich des verarbeitenden Gewerbes dokumentiert und sich weiterhin im Kern mit der Ressourceneffizienz in der Produktion beschäftigt. Projekte aus den Kategorien Wassermanagement, Trinkwasser, Sanierungstechnik Regenerative Energien, Luftreinhaltung, Lärmminderung, Landwirtschaft, Klimaanpassung, Bauen & Gebäude, Biotechnologie sowie Abwassertechnik wurden schließlich von einer tieferen Untersuchung

ausgeschlossen. Entweder adressierten diese Projekte nicht das verarbeitende Gewerbe (bspw. Projekte für öffentliche Kunden wie Deponien, Kläranlagen) und den Bereich der Produktion oder sie fokussierten auf Themen, die nicht primär der Ressourceneffizienz zuzuordnen waren (bspw. reine Emissionsreduktion). Projekte die ausschließlich das Ziel der Steigerung der Energieeffizienz verfolgten wurden ebenfalls von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

2. Maßnahmen- und Nutzenbeschreibung: Weiterhin wurde geprüft, ob die Berichte Maßnahmenbeschreibungen zur Ressourceneffizienz und /oder eine Nutzenbeschreibung (bspw. Quantifizierung von Ressourcen-Einsparungen) enthalten. Enthielten die Berichte keine dieser Informationen wurden sie ebenfalls von einer tiefergehenden Analyse ausgenommen.
3. Qualität der Dokumentation: Sowohl Art, Umfang als auch die inhaltliche Tiefe der Berichte aus den genannten Quellen ist sehr unterschiedlich. Sie reichen von Kurzpräsentationen über halbseitige Projektveröffentlichungen bis hin zu mehreren hundert Seiten detaillierter Projektvorgehens- und Ergebnisbeschreibung. Vor allem Kurzberichte ohne Projektkontext, fehlenden Beschreibungen von Vorgehensweisen, Maßnahmen und lediglich qualitativer Nutzenbeschreibung wurden unter diesem Kriterium ausgeschlossen.
4. Aussagekraft/Praxisrelevanz: Neben der Dokumentation von Industrieprojekten lieferten die Quellen auch viele Berichte zu Forschungsvorhaben. Unter dem Kriterium „Aussagekraft/Praxisrelevanz“ wurde daher geprüft, ob sich aufgrund einer tatsächlichen technischen und/oder organisatorischen Umsetzung, praktische Maßnahmen und Nutzen ableiten lassen. Insbesondere bei den Forschungsprojekten wurde daher darauf geachtet, ob es sich lediglich um theoretische Entwicklungen oder Projekte mit Demonstrations- und Implementierungsanteil (zumindest im Labormaßstab) handelt.
5. Aktualität: Im Zuge der ersten Überprüfung der Projektberichte konnte festgestellt werden, dass „ältere“

Dokumentationen überwiegend Maßnahmen enthielten, die entweder aufgrund heutiger, gesetzlicher Regelungen oder aufgrund der Technologiediffusion zum Stand der Technik gehören. Folglich wurde vereinbart, dass zusätzlich Projektberichte deren Projektabschluss vor 2004 datieren von einer tiefergehenden Analyse ausgeschlossen werden.

Letztlich wurden die Projektberichte aus den unterschiedlichen Quellen auf Dopplungen geprüft. Insbesondere die Cleaner Production Germany Plattform stellt eine sehr umfangreiche Sammlung von Berichten zur Verfügung. Hierin waren bereits mehrere Berichte aus anderen Programmen/Portalen enthalten (bspw. UIP- oder PIUS-Berichte).

Nach Prüfung und Bereinigung der Berichte ergab sich damit folgende Grundgesamtheit für die weitere tiefergehende Analyse der Projektberichte (siehe Abbildung 3).

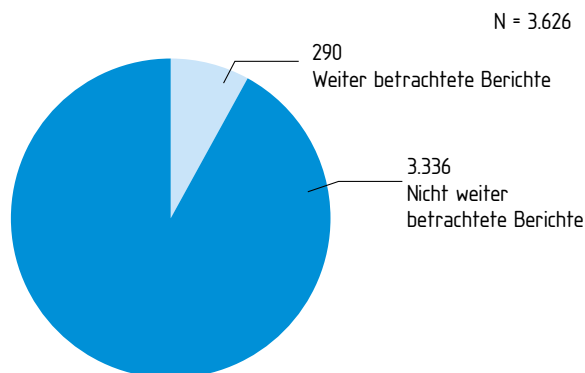


Abbildung 3: Übersicht zur Anzahl der Berichte in der tiefergehenden Analyse (Eigene Darstellung)

Insgesamt wurden 3.336 Projektberichte von einer tiefergehenden Betrachtung ausgeschlossen. Ein Großteil der Berichte wurde aufgrund eines irrelevanten Themenfokus sowie aufgrund starker Forschungsausrichtung (oftmals fehlende, valide Umsetzungsdaten) nicht weiter betrachtet. Folgende Abbildung 4 zeigt die Gründe und die jeweilige Anzahl der ausgeschlossenen Projektberichte.

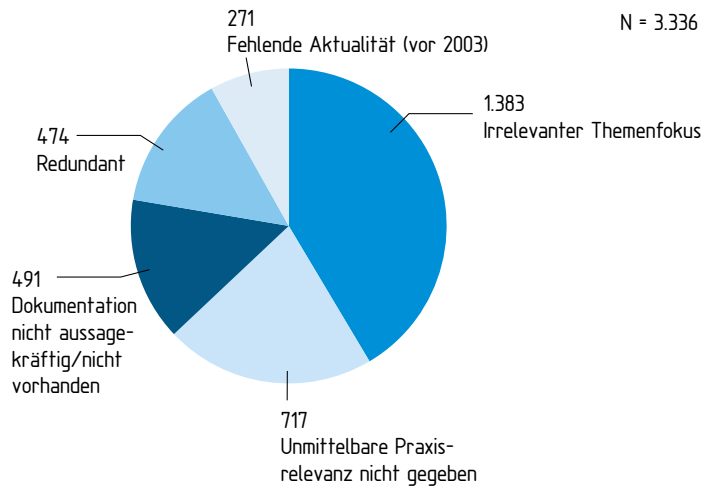


Abbildung 4: Übersicht zu den Ausschlussgründen von Projektberichten (Eigene Darstellung)

Die 290 Projektberichte die schließlich in die Detailanalyse eingingen, stammten aus folgenden Themenkategorien (siehe Abbildung 5). Obwohl die Anzahl in einzelnen Bereichen mitunter gering war (bspw. Abfalltechnik, Papier & Zellstoff), ließ die Auswertung trotzdem eine breite und gute Übersicht zu den Maßnahmen auf Prozessebene zu, da die Berichte zahlreiche Einzelmaßnahmen beinhalteten.

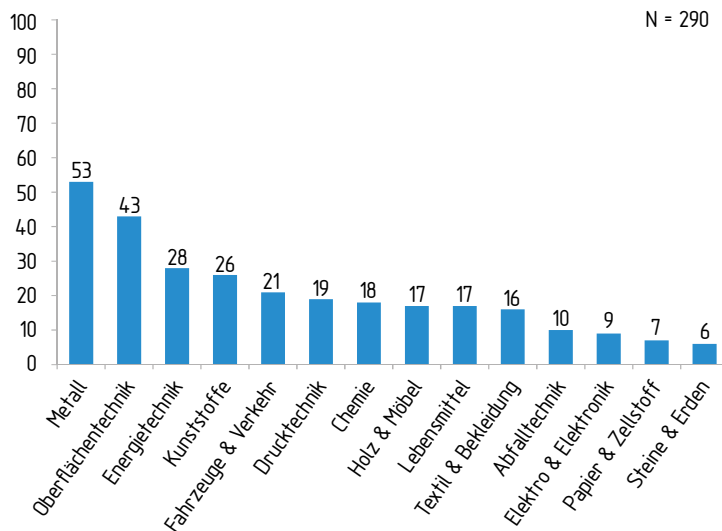


Abbildung 5: Anzahl der Projektberichte in der Detailanalyse nach Themenkategorie (Eigene Darstellung)

2.2.2 Detailanalyse - Maßnahmencharakterisierung

Für die nach der Grobanalyse verbliebenen Projektberichte wurden im zweiten Schritt alle enthaltenen Maßnahmen erfasst. Neben der Beschreibung der Maßnahmen selbst, wurde für jede Maßnahme der Ressourcenbereich sowie der Technologiebereich spezifiziert, in dem die Maßnahme angesetzt wurde.

Unter dem Ressourcenbereich wurden folgende Punkte pro Maßnahme erfasst:

- Ressourcenstrom: In den Projektberichten werden unterschiedliche Kategorien von Ressourcenströmen betrachtet. Handelt es sich im Projekt um Maßnahmen der Abfallbehandlung oder um Optimierungsmaßnahmen direkt in den Fertigungs- sowie Infrastrukturprozessen wurde entsprechend „Abfall“ oder „Input“ als Kategorie vermerkt.
- Spezifizierung und Art der Ressource: Zunächst wurde die Ressource wie im Projektbericht enthalten benannt und danach einer der Ressourcenkategorien „Natürliche Ressourcen“ wie Luft und Wasser, „(Produktions-) Material“ oder der Kategorie „Hilfs- und Betriebsstoffe“ zugeordnet.
- Spezifische Zielsetzung und Art der Optimierung: Letztlich wurde den einzelnen Maßnahmen die in den Projektberichten ausgewiesene Zielsetzung zugeordnet sowie festgestellt, um welche Art der Optimierung es sich bei der Maßnahme handelt (bspw. Substitution/Wechsel, Wiederverwendung, Weiterverwendung, schlichte Optimierung).
- Im Technologiebereich wurde hingegen ergänzt, in welchem Bereich die Maßnahme ansetzt. Hierbei wurden folgende Kategorien unterschieden:
 - Produktgestaltung: Bei Maßnahmen in dieser Kategorie, handelt es sich um Aktivitäten, die bereits in der Produktentwicklung durchgeführt werden und später Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch in der Herstellung haben.
 - Herstellung - primäre Prozesse/Fertigungsverfahren: Hierunter wurden Maßnahmen kategorisiert, die direkt im Fertigungsverfahren beziehungsweise in der

Verfahrenstechnik ansetzen. Die Fertigungsverfahren wurden unter Rückgriff auf die DIN 8580 und die Verfahrenstechnik anhand der Grundoperationen (Trennen/Vereinigen von Stoffen) klassifiziert. Falls möglich wurde die Maßnahme zudem im konkreten Prozessschritt der Verfahren verortet.

- Herstellung – sekundäre Prozesse/Produktionsumfeld: Maßnahmen, die zwar in der Produktion ergriffen werden aber nicht im eigentlichen Produktionsprozess ansetzen wurden unter dieser Kategorie vermerkt. Hierbei handelt es sich um Hilfs- und Vorbereitungsprozesse, Arbeitsumfeld- und Infrastrukturmaßnahmen oder auch Abfall-/Recyclingströme.
- Organisation: Maßnahmen, die organisatorischer Natur sind – also Maßnahmen die weder die Produktgestaltung betreffen noch wesentlich in die Fertigungstechnologie eingreifen – wurden unter dieser Kategorie erfasst. Sie betreffen die räumliche Anordnung von Produktionseinheiten, die Gestaltung von Material- und Informationsflüssen, Qualifikationen oder die Fertigungssteuerung und -kontrolle.
- Sofern die Projektberichte spezifische Angaben zur Übertragbarkeit bestimmter Maßnahmen machten, wurden auch diese unter dem Technologiebereich dokumentiert.

2.2.3 Detailanalyse – Nutzendarstellung

Im Zuge der Maßnahmenaufnahme wurde zudem der Nutzen der einzelnen Maßnahmen in Bezug auf die Ressourceneffizienz erfasst. Hierbei ging es darum die Auswirkungen der beschriebenen Maßnahmen oder Maßnahmenbündel auf die einzelnen Ressourcen darzustellen.

Im ersten Schritt wurden die Auswirkungen auf die einzelnen Ressourcen zunächst qualitativ beschrieben und kategorisiert (teilweise/vollständige Reduzierung oder auch Steigerung des Ressourceneinsatzes, Substitution der Ressource, Nutzbarmachung von bspw. Nebenprodukten/Abfällen, Steigerung der Ausbeute).

Danach wurden die in den Projektberichten verfügbaren quantitativen Daten zu den Auswirkungen zusammengetragen. Da die Quantifizierungen zu den Ressourcenwirkungen in den Projektberichten sehr unterschiedlich dargestellt sind, wurde der Nutzen wiederum in unterschiedlichen Kategorien erfasst: Prozentuale/Relative Änderungen ohne zugehörige Mengenangaben (Vorher-Nachher), Ressourcenverbräuche mit konkreten Mengenangaben (Vorher-Nachher) und Ressourcenauswirkungen ausgedrückt in monetären Größen jedoch ohne Mengenangaben (Vorher-Nachher) sowie Ressourcenauswirkungen ausgedrückt in sonstigen Größen (wie beispielsweise CO₂).

2.2.4 Konzept zur Verdichtung und Auswertung der Daten

Zur Verdichtung bzw. Zusammenfassung der Daten wurden vier Schritte durchlaufen.

Als erstes wurden die Daten anhand der Überkategorien des Technologiebereichs (siehe Kapitel 2.2.2) zusammengefasst. Im Zuge der Maßnahmencharakterisierung ließ sich feststellen, dass sich die Maßnahmen im Wesentlichen unter drei Aspekten beziehungsweise Bereichen getrennt betrachten lassen.

- Organisation
- Produktdesign/-entwicklung sowie
- Produktion

Speziell Maßnahmen im Bereich der Organisation erwiesen sich als branchenunabhängig und ließen sich einzelnen Prozessen oder Prozessschritten in der Produktion nur schwer direkt zuweisen.

Im zweiten Schritt wurden die Maßnahmen in den jeweiligen Überkategorien weiter untergliedert und nach ähnlichen Ansatzpunkten zusammengefasst.

Im Bereich der Organisation stand hierbei im Vordergrund, Hinweise zu liefern, für welche Problemstellungen und in welchen konkreten Verantwortungsbereichen (bspw.

Beschaffung/Disposition, Logistik, Planung) die beschriebenen, organisatorischen Maßnahmen und Methoden ansetzen (siehe Kapitel 3).

Für den Bereich der Produktion wurden die einzelnen Maßnahmen, sofern bearbeitende Verfahren betroffen waren, zunächst unter den Fertigungsverfahren der DIN 8580 oder im Falle von verarbeitenden Verfahren unter den Grundoperationen zusammengefasst. Zudem wurden die Maßnahmen den folgenden Bereichen zugeordnet:

- Produktionsplanung/-steuerung, Arbeitsvorbereitung: Planende und steuernde Aktivitäten im Vorfeld der Produktion beziehungsweise den Fertigungsschritten
- Prozessperipherie: Systeme und Anlagen, die Produktionsprozesse unterstützen, indem sie zum Beispiel Druckluft, Wärme oder Kälte zur Verfügung stellen
- Prozesskette: Abfolge verschiedener Arbeits-/Fertigungsschritte und Maschinen in Bezug auf die definierten Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und der Grundoperationen (Verfahrenstechnik).
- Prozessschritte: Einzelne Arbeits- beziehungsweise Fertigungsschritte innerhalb der Prozesskette

Maßnahmen in den jeweiligen Kategorien wurden dann weiter als „organisatorisch“, „technisch-organisatorisch“ oder „technisch“ spezifiziert. Im Bereich der Produktion wurden unter „organisatorisch“ alle Maßnahmen verstanden, die beispielsweise in der operativen Produktionsplanung bzw. -steuerung oder der Arbeitsvorbereitung angesiedelt waren. Hierunter fielen vor allem die Verbesserung von Informationsflüssen und angepasste Vorgaben als Input für die Produktion. Technisch-organisatorische Maßnahmen fanden hingegen direkt in der Prozessperipherie oder der Fertigungs-Prozesskette statt, wobei die jeweiligen Maßnahmen sowohl technische als auch organisatorische Änderungen nach sich ziehen. Technische Maßnahmen waren ebenfalls in der Fertigungsperipherie, in der Prozesskette

bzw. einzelnen Prozessschritten verortet, sind jedoch rein technischer Natur und machten keine oder kaum organisatorische Anpassungen nötig.

Maßnahmen in der Überkategorie Produktentwicklung beziehungsweise Produktdesign wurden nur vereinzelt dargestellt und verteilten sich auf sehr unterschiedliche Produkte. Auch eine Verdichtung der Maßnahmen unter den Aspekten „Maßnahmen am Endprodukt und den jeweiligen Bauteilen (B2C)“ sowie „Maßnahmen an Maschinen und Maschinenkomponenten (B2B)“ brachte keine auswertbaren Ergebnisse, so dass auf eine weitere Analyse dieser Kategorie verzichtet wurde.

Im dritten Schritt wurden den Maßnahmenkategorien auf Basis der Datentabelle der jeweilige Nutzen zugewiesen. Sofern die Datenlage dies zuließ, wurde der Nutzen quantifiziert und falls dies nicht möglich war qualitativ beschrieben. Die ausgewiesenen Werte wurden dabei durch Angaben zum Projektkontext ergänzt, um darzustellen unter welchen Gegebenheiten ein bestimmter Nutzen erzielt werden konnte.

Eine seriöse Ableitung von Benchmarkwerten war in diesem Kontext nicht möglich, da die Berichte und folglich die Datengrundlage hierfür nicht ausreichten.

Im letzten Schritt wurden die Maßnahmen differenziert nach den einzelnen Kategorien ausgewertet.

Das folgende Kapitel 3 stellt nun die Ergebnisse der Untersuchungen und Auswertungen vor. Zunächst werden Maßnahmen behandelt, die dem Bereich der Produktion zugeordnet sind. Kapitel 3.1 bis 3.6 sind den bearbeitenden (Fertigungs-) Verfahren gewidmet, während Kapitel 3.7 die Ergebnisse zu den verarbeitenden Verfahren darstellt. Kapitel 3.8 befasst sich schließlich mit Maßnahmen, die dem Bereich der Organisation zugeordnet sind.

Die Maßnahmen aus den Projektberichten sind für eine übersichtliche Darstellung in tabellarischer Form aufgelistet. Die Tabellen sind dabei folgendermaßen strukturiert:

- Maßnahmenkategorie: Hier sind Überbegriffe vermerkt, unter dem sich die folgenden Maßnahmen zusammenfassen lassen. Sie beinhalten die grundlegende Strategie, die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz angewendet wurde.
- Maßnahmen: In dieser Spalte sind die einzelnen Maßnahmen aus den Projektberichten dokumentiert.
- Zielsetzung/Nutzen: Pro Maßnahme sind hier die im Projektbericht beschriebene Zielsetzung sowie der ausgewiesene Nutzen zusammengefasst.
- Prozess: Hierunter ist vermerkt, wo im jeweiligen Produktionsbereich (Peripherie/Infrastruktur, Herstellungsprozess oder einzelner Prozessschritt) die Maßnahme angesetzt wurde. Für die organisatorischen Maßnahmen wurde hier auf eine Einordnung verzichtet und lediglich der Bereich (Arbeitsvorbereitung, Einkauf etc.) benannt.
- Stellhebel: Unter „Stellhebel“ sind schließlich die einzelnen Ressourcen vermerkt, die durch eine Maßnahme laut Projektbericht berührt wurden. Hier wird zunächst die Ressourcenkategorie angegeben und – sofern im Bericht weiter spezifiziert – eine genaue Ressource benannt. Bei den organisatorischen Maßnahmen wurden Stellhebel nicht vermerkt, da eine Zuordnung nicht eindeutig möglich war.

3 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG

3.1 Auswertung der Projektdokumentation zu Fertigungsverfahren des Urformens

Urformen zählt zu den bedeutendsten Fertigungsverfahren der industriellen Produktion. Das Urformen eines Fertigteils oder Halbzeuges kann der erste Schritt in einer komplexen Abfolge von verschiedenen Prozess- und Bearbeitungsschritten sein, an deren Ende das fertige Produkt steht. Das Fertigungsverfahren des Urformens ist nach DIN 8580⁹ wie folgt definiert:

„Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes; hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung.“

Urformen ist die direkte Formgebung von Fertigteilen oder Halbzeugen aus verschiedenen formlosen Rohstoffen. Das Urformen umfasst dabei alle Verfahren, bei denen aus einem formlosen Stoff ein Körper geschaffen wird. Die Rohstoffe können dabei als Formmasse vorliegen wie beispielsweise Granulate oder Pulver beim Spritzgießen (Urformen von Kunststoffen) oder als flüssiges Vorprodukt in Form einer Schmelze beim Gießen (Urformen aus metallischen Werkstoffen). Urformtechnische Prozessketten sind, im Vergleich zu anderen Prozessketten, oftmals durch einen hohen Energie- und Rohstoffeinsatz gekennzeichnet. Für die Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren wurde 2012 ein Endenergieverbrauch von 80.653 Terajoule aufgewendet. Für die Herstellung von Nichteisen-Metallen und das vergießen dieser wurden in Summe 115.252 Terajoule aufgewendet¹⁰.

Die Auswertung von öffentlich zugänglichen Abschlussdokumentationen zu Förderprojekten zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei Prozessschritten des Urformens sowie im Produktionsumfeld zeigte, dass Unternehmen folgende Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz ergriffen haben:

- Ein-/Aufschmelzen von Metallen für den Metallguss,

⁹ DIN 8580 (2003), S. 4

¹⁰ vgl. AG Energiebilanzen e.V.: Bilanz 2012. Stand 12.05.2015

- Urformen von Fertigteilen und Halbzeugen aus Metallen und Nichteisen Metallen (Formgebung, Metallguss) sowie
- Urformen von Produkten aus Kunststoffen und Gummi (Formgebung).

Zunächst soll jedoch auf übergeordneter Ebene der Prozess des Urformens beschrieben und der Beitrag zur Ressourceneffizienz dargestellt werden.

3.1.1 Ressourceneffizienz bei Fertigungsverfahren des Urformens

Mit Hilfe der Gießereitechnik erfolgt das Urformen von metallischen Werkstoffen. Das Fertigungsverfahren des Gießens zeichnet sich durch freie Gestaltungsmöglichkeiten mit funktional optimal ausgelegten Bauteilen aus, die auch komplexe dreidimensionale Strukturen besitzen können und höchsten mechanischen Beanspruchungen genügen. Weiterhin zeichnet sich das Gießen durch eine große Werkstoffvielfalt aus und ist sowohl für die Einzel- wie auch Großserienfertigung geeignet. Die zu fertigenden Produkte sind hinsichtlich Größe und Wanddicke nahezu unbegrenzt. Durch Gießen entstehen sowohl Halbzeuge als auch Fertigteile, die in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrtindustrie, dem Maschinenbau und anderen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. Die durch Gießen herstellbaren Bauteile und Produkte reichen von wenigen Gramm im Kunstguss bis zu mehreren hundert Tonnen im Schwermaschinenbau.

Das Spritzgießen ist ein kunststoffverarbeitendes Urformverfahren. Typische Anwendungsbereiche des Spritzgießens sind die Herstellung technischer Teile wie Gehäuse und Funktionselemente für Werkzeugmaschinen und Haushaltsgeräte oder in der Elektro- und Elektronikindustrie. Kunststoffverarbeitende Fertigungsverfahren zeichnen sich in der Regel dadurch aus, dass Energie nur kurzzeitig zum Aufschmelzen und Urformen benötigt wird und kurzzeitig wieder aus dem Werkstoff abgeführt werden muss. Ein wesentlicher Stellhebel zur Optimierung des Ressourceneinsatzes ist der Materialeinsatz.

Das Gießen von Metallen sowie das Spritzgießen sind Fertigungsverfahren, die sich durch eine große Bandbreite von Bauteilgröße und -gewicht auszeichnen.

Abbildung 6 zeigt in abstrakter Darstellung die wesentlichen Prozessschritte des Urformens durch Metall-Gießen und Spritzguss.

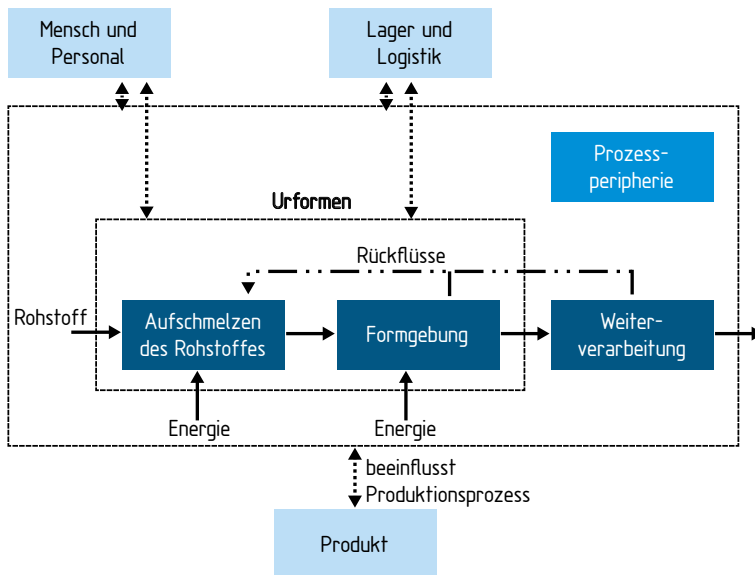


Abbildung 6: Abstraktes Prozessbild des Urformens (Eigene Darstellung)

Wie kann die Ressourceneffizienz für Fertigungsverfahren des Urformens positiv beeinflusst werden? Um diese Frage zu beantworten, ist zunächst zu bestimmen, welche Hebel oder auch Stellgrößen den Ressourcenverbrauch beeinflussen können und wie entsprechende Wirkketten aussehen. Ausgangspunkt der Betrachtungen sind dabei die eingesetzten Ressourcen, wie Material im Sinne von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Produktionsmaterial und Energie. Zunächst erfolgt die Betrachtung des Materials.

Eine Verbesserung der Ressourcennutzung auf Ebene der Produktion für Betriebs- und Hilfsstoffe kann durch Substitution,

Wiederverwertung oder optimierte Verfahren erfolgen. Die Substitution des Produktionsmaterials erfolgt auf Ebene der Produktentwicklung. Eine Verbesserung der Ressourcennutzung des Produktionsmaterials erfolgt auf Ebene der Produktion durch die Wiederverwertung sowie durch optimierte Verfahren. Die genannten Strategien verfolgen das Ziel einer Reduktion des eingesetzten Primärmaterials. Diese Strategien können auch für sekundäre Prozesse im Produktionsumfeld angewendet werden.

Mit Blick auf die Ressource Energie kann diese in urform-technischen Prozessketten folgende Ausprägungen haben: elektrische Energie und/ oder Brennstoffe, Wärme, Kälte oder Druckluft. Zur Reduktion des Energieeinsatzes können Strategien wie Kaskadennutzung, Substitution und optimierte Verfahren zur Anwendung kommen.

Darüber hinaus können Maßnahmen ergriffen werden, die einen technologisch-organisatorischen Charakter haben, wie zum Beispiel Maßnahmen die zur Sicherung und Steuerung der Prozessqualität beitragen. Diese Maßnahmen bewirken indirekt eine Reduktion des Material- und Energieeinsatzes. Entsprechende Maßnahmen sind der Strategie „optimierter Verfahren“ zuzurechnen.

3.1.2 Ressourceneffizienz beim Aufschmelzen von Metallen und im Metallguss

Der Metallguss wird eingesetzt, um Bauteile mit geometrisch bestimmter Form zu fertigen. Beim Gießen wird die Geometrie des Werkstücks aus der zunächst flüssigen Schmelze geschaffen. Erst durch die Erstarrung während der Abkühlung entsteht der feste Körper, also das eigentliche Gussteil. Bei der Herstellung von Gussteilen verlaufen drei Vorgänge parallel: die Herstellung des Kerns, die Herstellung der Form und das Schmelzen selbst.

Nach der Vorlage des gewünschten Gussteils wird ein Modell gefertigt. Dieses Modell dient als Grundlage für die Gussform. Es existieren Dauermodelle (Holz, Metall, ...) und verlorene Modelle (Wachs, Polystyrol, ...). Ebenso werden auch die Gussformen in Dauerformen und verlorene Formen eingeteilt. Dauerformen sind aus metallischem Material und werden für eine hohe

Anzahl an Gießvorgängen eingesetzt. Verlorene Formen dagegen werden aus verdichtetem, gebundenem Sand oder aus Keramik hergestellt und können nur für einen Abguss genutzt werden. Sandformen werden in der Regel in einen Formkasten eingebracht. Die Gestalt des Gussteils ist der Hohlraum in den Formen. In die Form eingebrachte Kerne werden zur Realisierung von Hohlräumen im Inneren des Gussteils benutzt. Die Kerne werden ebenfalls in Dauerkerne und verlorene Kerne eingeteilt. Nach der Herstellung der Form und dem zusammenführen mit den Kernen zur gießbereiten Form, kann das flüssige Metall (die Schmelze) in die Form gegossen werden. Das flüssige Metall erstarrt in der Form und bildet das Gussteil.

Die Auswertung der verfügbaren Projektberichte verschiedener Förderprogramme zeigten Maßnahmen in verschiedenen Bereichen und Prozessschritten auf, wodurch direkt aber auch indirekt der Einsatz von Rohstoffen (Produktionsmaterial, Betriebs- und Hilfsstoffe) sowie der Energieeinsatz reduziert werden konnte.

- Verbesserung der Prozessführung und -überwachung durch den Einsatz von Messsystemen insbesondere im Prozessschritt des Schmelzens (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie Prozesssteuerung).
- Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Verbesserung der Prozessqualität beispielsweise zur Auslegung von Kernen, die beim Gießen zum Einsatz kommen (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie Simulationswerkzeuge).
- Einsatz von Rekuperatoren zur Weiternutzung der in der Abwärme enthaltenen Energie (Wärme). Rekuperatoren können im Abgas- und Abluftsystem von Öfen bspw. Kupolöfen Anwendung finden aber auch bei anderen Wärmeanwendungen in Gießereien beispielsweise bei Pfannenaufheizstationen für die Schmelze (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie Nutzung der Abwärme).
- Umrüstung auf ein alternatives Brennersystem in Verbindung mit einer Teilsubstitution des zum Einsatz kommenden Energieträgers beim Aufschmelzen der Metalle

sowie der Beheizung von Transportpfannen (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren).

- Ermöglichung der Injektion von Metallstäuben in Ofensystemen durch Prozess- und Technologieinnovationen zur Wiederverwertung dieser (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie Wiedereinsatz von Reststoffen/ Abfall).
- Verbesserung der Wiederaufbereitung von Formsand (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren).
- Substitution des Energieträgers beim Aufschmelzen von Metallen (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie Änderung der Energiebereitstellung).
- Verbesserung der Metallausbeute beim Einschmelzen von Reststoffen (siehe Tabelle 3, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren).

Durch die Umsetzung der Maßnahmen konnten Effekte wie die Verringerung von negativen Umwelteinwirkungen, die Verkürzung von Prozesszeiten, die Reduktion von Kosten (wettbewerblicher Vorteil) sowie eine Verbesserung der Prozessleistung erreicht werden. In Tabelle 3 sind die einzelnen Ressourceneffizienzmaßnahmen im Bereich des Metallguss aufgezeigt, den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet sowie dem Stellhebel und der genutzten Strategie.

Die in der Tabelle 3 dargestellten Maßnahmen sind mit unterschiedlichen Mengen an Material- und Energieeinsparungen sowie Aufwand zur Umsetzung verbunden. In Folge der nicht durchgängigen Datengrundlage (quantitative und monetäre Höhe der Einsparungen, Investitionsaufwand) erfolgt nur eine Darstellung der Maßnahmen zu denen eine aussagekräftige Datengrundlage zu Kosten und Nutzen vorliegen (siehe Abbildung 7).

Das Erschmelzen von Gusseisen in einem Heißwindkupolofen erfolgt oftmals durch die Verwendung von Koks zur Erzeugung der notwendigen Energie. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde der Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern untersucht (Abbildung 7, Maßnahme 1). In dem spezifischen Fall

ermöglichte der Einsatz der Brenner eine teilweise Substitution des Koks (Reduktion des Kokeinsatz um 6 %) (Abbildung 7, Maßnahme 2). Zugleich ermöglichen die Brenner die Injektion größerer Staubmengen in die Blasformebene des Kupolofens ohne ein Kaltblasen. Im Zuge dessen konnte der Einsatz von Zuschlagstoffen um 20 % reduziert werden¹¹.

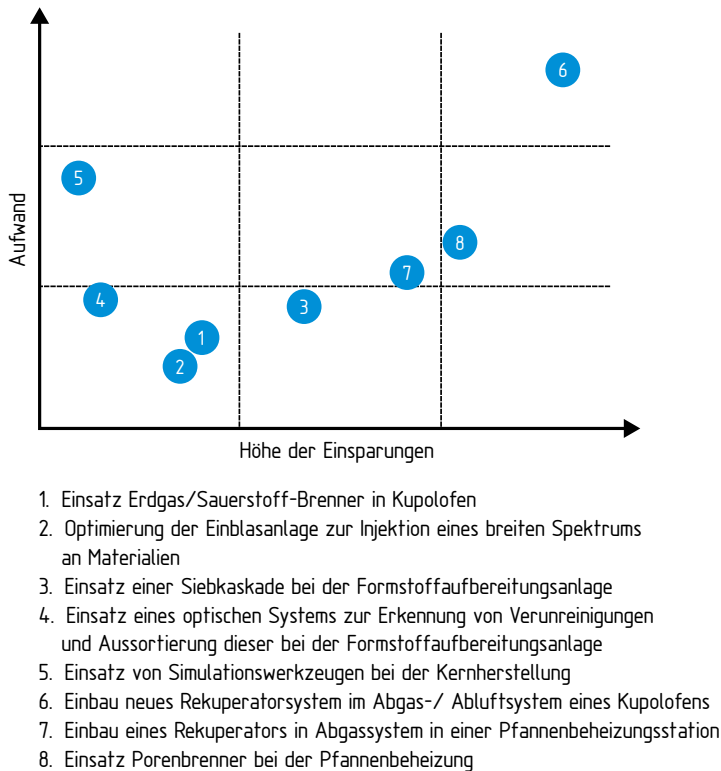


Abbildung 7: Darstellung des Aufwands und Nutzens ausgewählter Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenbedarfs im Metallguss (Eigene Darstellung)

Die Verbesserung der Anlagentechnik einer Sandaufbereitungsanlage in einer Aluminiumgießerei führte zu einer Einsparung von Neusand in Höhe von mehr als 12.000 t pro Jahr. Die Anlage ermöglicht durch eine innovative Siebkaskade und ein optisches Messsystem zur Erkennung kleinster Verunreinigungen und

¹¹ Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005)

deren Ausschleusen sowie weitere Maßnahmen eine vollständige Trennung regenerierbaren Formsands von dem zu entsorgenden Kernsand (Abbildung 7, Maßnahme 3,4)¹².

In Eisen- und Stahl-Gießereien ist die Herstellung von chemisch gebundenen Kernen Stand der Technik. Durch die Reduktion des Einsatzes von Bindern und Härtern können die bei der Kernherstellung anfallenden Abfallstoffe minimiert werden. In dem realisierten Vorhaben wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt, was die bei der Kernherstellung ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge quantitativ berechnet, simuliert und den optimalen Arbeitsbereich modelliert. Durch den Einsatz der Software kann der Verbrauch chemisch gebundener Formstoffe für die Kernherstellung mittelfristig um 15 % gesenkt werden (Abbildung 7, Maßnahme 5)¹³.

Der Austausch eines alten Rekuperators und Ersatz durch ein neues Rekuperatorkonzept im Abgas- und Abluftsystem (bis zu 1.200°C) eines Kupolofens, ermöglichte die wirtschaftliche Nutzung von zusätzlichen 10 bis 14 MW Abwärme (Abbildung 7, Maßnahme 6). Die ganzjährig zur Verfügung stehende Abwärme wird durch ein ca. 400m langes Rohrleitungssystem mit heißem Thermoöl (Vorlauftemperatur von 260–280°C) an ein benachbartes Unternehmen geliefert. Dort wird die Abwärme zur Erzeugung von Sattedampf genutzt, wodurch sich eine Einsparung in Höhe von 2/3 des Erdgasverbrauchs ergibt. Die erforderlichen Investitionen betrugen ca. 5 Millionen €¹⁴.

Oftmals erfolgt die Auf- und Beheizung von Pfannen zum Transport flüssiger Schmelze in Gießereien durch gasbefeuerte Flammenbrenner. Ziel war es eine Pfannenaufheizstation mit fünf Pfannenplätzen und drei Brennern energieeffizienter zu gestalten und die Standzeit der Pfannen zu erhöhen. Hierbei zeigte sich die Verwendung von Porenbrennern in Kombination mit baulichen Änderungen an der Pfannenaufheizstation als eine geeignete Technologie (Abbildung 7, Maßnahme 8). Hierbei wird die Wärme des Porenbrenners über Infrarotstrahlung und Konvektion auf an die Pfannen angepasste Strahlrohre übertragen, wodurch die

¹² Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2008)

¹³ Bundesministerium für Bildung und Forschung (2008)

¹⁴ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009a)

Aufheizung der Pfannen direkt und gleichmäßig gesteuert werden kann. Die entstehenden heißen Abgase werden erfasst und durch den Einbau eines Rekuperators im Abgas- und Abluftsystem erfolgt die Rückgewinnung von Wärme, die zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt wird (Abbildung 7, Maßnahme 7). Die Umsetzungen dieser Maßnahmen führten zu einer Einsparung des jährlichen Erdgasverbrauchs von mehr als 60.000 m³/a (Einsparung von 2/3 des Erdgasverbrauchs für Brenner). Gleichzeitig wirkt sich der Porenbrenner positiv auf die Standzeit der Pfannen aus, durch eine geringere Beanspruchung der Feuerfestmaterialien (Erhöhung der Standzeit um Faktor 2). Die mit den Maßnahmen verbundenen Anschaffungskosten beliefen sich auf ca. 200.000 €. Für den spezifischen Fall ergab sich eine Amortisationsdauer von weniger als 6 Jahren¹⁵.

¹⁵ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011)

Tabelle 3: Maßnahmen im Prozess des Metallgusses und der Prozessperipherie

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Prozesssteuerung (Optimiertes Verfahren)	Entwicklung eines handlanzenbasierten optischen Temperaturmesssystems zur Temperaturführung bei der Behandlung heißer Metall- und Glasschmelzen [1]	- Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Mess- und Regelungsverfahrens zur Verbesserung der Temperaturführung bei der Behandlung von heißen Schmelzen - Einsparung elektrischer Energie bei der Erzeugung von Schmelzen, - Verkürzung der Schmelzbehandlungszeiten, - Einsparung von Argon als Spülgas zum Kaltspülen	(Ein-) Schmelzen von Metallen (Prozesskette)	Energie (Wärme)
	Entwicklung einer dynamischen Prozesssteuerung [2]	- Optimierung der Sauerstoffzufuhr um den Abbrand von Chrom und anderen Metallen bei der Entkohlung von hoch-chromhaltigen Stählen zu minimieren - Präzise Temperaturführung (Prozessführung), - Reduktion des Einsatzes von Hilfsstoffen	Sekundärmetallurgische Behandlung von Stahl (Prozess)	Sauerstoffzufuhr
Prognose- und Simulationswerkzeuges (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Einsatz eines Prognose- und Simulationswerkzeuges für die Herstellung von Gießlereichen [3]	- Reduktion von Ressourcenverbrauch und Emissionen - Prozessüberwachung, - Reduktion der Produktionskosten durch Prozessbewertung	Herstellung von Kernen für Gießformen (Prozessperipherie)	Material (Material für Kernherstellung)
Nutzung von Abwärme (Kaskadennutzung)	Einbau eines neuen Rekuperatorsystems im Abgas- / Abluftsystem [4]	- Erhöhung des Anteils der Abwärme (Energie), die weiterverwendet wird - Nutzung der Abwärme für die Erzeugung von Heißwind, Heißwassererzeugung und Erzeugung von Sattldampf in einem anderen Unternehmen	Schmelzen von Metallen in einem Kupolofen (Prozessschritt)	Energie (Wärme)
	Einbau eines Rekuperators ins Abgassystem in einer Pfannenbeheizungsstation [5] [6]	- Erhöhung des Anteils der Abwärme (Energie), die weiterverwendet wird - Nutzung der Abwärme für Sekundanwendungen und Beheizung der Halle	Erwärmen von Transportpfannen zum Transport von Schmelze (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)

Tabelle 3: Maßnahmen im Prozess des Metallgusses und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Alternative Technologie (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Einsatz eines Porenbrenners in einer Pfannen-beheizungsstation [5]	- Verbesserung des Energieeinsatzes durch Reduktion von Übertragungsverlusten - Reduktion des Wärmeeintrags in Umgebung, - Verbesserung der Standzeiten der Pfannen	Erwärmen von Transportpfannen zum Transport von Schmelze (Prozessperipherie)	Energie (Gas)
	Aufbau einer Schmelzzentrifuge (gerührtes Salzbad in Verbindung mit einer semikontinuierlichen Entfernung der oxidischen Bestandteile aus der Salzschlacke) im technischen Produktionsmaßstab [7]	- Ermöglichen eines aus ökologischer und ökonomischer Sicht rentablen Verfahrens zum Einschmelzen von feinteiligen Aluminiumreststoffen - Erhöhung der Aluminiarausbeute gegenüber konventionellen Produktionsanlagen, - Reduktion des Schlackenarfs	Erzeugung von Metall (Prozess)	Material
	Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern in Kupolofen [8]	- Verbesserung des Betriebs des Kupolofens: Steigerung der Schmelzleistung bei gleichzeitiger Reduzierung des Koksensatzes, - Neue Brennertechnologie ermöglicht direkte Verwertung von gießereigenen Stäuben, - Reduzierung von Entsorgungskosten	Erzeugung von Metall (Prozess)	Material (Gießereisäube) Energie (Gas)
	Verwendung von Siebkaskaden zur Vorreinigung in einer Formstoffaufbereitungsanlage [9]	- Vollständige Trennung von Kernsand und Altsand - Vermeidung von Fremdstoffen im Formsand, - Reduktion des Neusandensatzes	Aufbereitung des Form-sands (Prozessperipherie)	Material (Formsand)
	Optische Formstofftrennung zum Aussortieren von kleinsten Verunreinigungen in einer Formstoff-aufbereitungsanlage [9]	- Vollständige Trennung von Kernsand und Altsand - Vermeidung von Fremdstoffen im Formsand, - Reduktion des Neusandensatzes	Aufbereitung des Form-sands (Prozessperipherie)	Material (Formsand)

Tabelle 3: Maßnahmen im Prozess des Metallgusses und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Alternative Technologie (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Verwendung von Siebkaskaden zur Vorreinigung in einer Formstoffaufbereitungsanlage [9]	– Vollständige Trennung von Kernsand und Altsand – Vermeidung von Fremdstoffen im Formsand, – Reduktion des Neusandensatzes	Aufbereitung des Formsand (Prozessperipherie)	Material (Formsand)
	Optische Formstofftrennung zum Aussortieren von kleinsten Verunreinigungen in einer Formstoffaufbereitungsanlage [9]	– Vollständige Trennung von Kernsand und Altsand – Vermeidung von Fremdstoffen im Formsand, – Reduktion des Neusandensatzes	Aufbereitung des Formsand (Prozessperipherie)	Material (Formsand)
Alternatives Fertigungsverfahren (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Entwicklung neuartigen Schwerkraftgusssofen für Titan-Feinguss [10]	– Fertigung von Großbauteilen als Halbzeug durch Feinguss anstatt Fräsen des Fertigteils aus dem Vollen – Reduktion des Materialbedarfs (Titan)	Gießen von Halbzeugen aus Titan-Feinguss (Prozesskette)	Material (Titan)
Änderung der Energiebereitstellung (Substitution/ Wechsel)	Entwicklung eines Herstellverfahrens für Brikettprodukte aus Braunkohlekoks, die den Mindestanforderungen für den Schachtofenbetrieb entsprechen [11]	– Entwicklung von Brikettprodukten aus Braunkohle die für Kleinschachtofen optimal geeignet sind – Teilweise Substitution von Steinkohlekoks zur Befuerung von Kleinschachtofen	Erzeugung von Metall (Prozesskette)	Material (Braunkohlekoks)
Wiedereinsatz von Reststoffen/Abfall (Verwertung (stofflich))	Entwicklung einer geeigneten Einblasanlage zur Injektion eines breiten Spektrums einblasfähiger Materialien [12]	– Optimierung eines Verfahrens zum werksinternen Recycling von Fe-, Zn-, Pb- und alkalischen feinkörnigen Reststoffen aus Gasreinigung und Wasseraufbereitungsanlagen von Hochöfen, Stahl- und Warmbandwerken – Reduktion des Primärmaterialiensatzes	Metallerzeugung (Prozesskette)	Material (Metallstäube)

Tabelle 3: Maßnahmen im Prozess des Metallgusses und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Wiedereinsatz von Reststoffen/ Abfall	Direkteinsatz von Schleifstaub aus aluminiumhaltigen Kupferlegierungen in Gießereien [8]	- Erhöhung des Direkteinsatzes von Schrott in Gießereien - Reduktion des Einsatz von Primärmaterial	Auf- / Einschmelzen von Metallen (Prozessschritt)	Material (aluminiumhaltiger Schleifstaub)
	Ermittlung der Grenzen von Verunreinigungen bei Schrotten bis zu denen ein Direkteinsatz erfolgen kann [13]	- Erhöhung des Direkteinsatzes von Schrott in Gießereien - Reduktion des Einsatz von Primärmaterial	Auf- / Einschmelzen von Metallen (Prozessschritt)	Material (Schrott)

QUELLEN TABELLE 3

- [1] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Neuartige Mess- und Regelungsverfahren für eine Ressourcen schonenden Temperaturführung bei der Behandlung heißer Schmelzen (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/01RI05239_-_Abschlussbericht.pdf
- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Senkung des Verbrauchs von Rohstoffen und des Anfalls von Reststoffen bei der Erzeugung von hoch-chromhaltigen Edelstählen im AOD-Konverter (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30772_-_Abschlussbericht.pdf
- [3] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Einsatz von virtuellen Entwicklungswerkzeugen für die nachhaltige Verarbeitung von Mehrphasenwerkstoffen am Beispiel der Herstellung von Gießereikernen (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI05008_-_Abschlussbericht.pdf
- [4] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Abwärmenutzung bei einem Kupolofen (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_Demo_-_001569_Georg_Fischer_Automobilguss.pdf
- [5] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Einsatz einer energieeffizienten Pfannenaufheizstation bei der Herstellung von Edelstahl (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20182_Edelstahlwerke_Schmees_01.pdf

-
- [6] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Energieeffiziente und emissionsarme Herstellung von keramischen Stahlgussformen. 2008. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1jmvVZO>
- [7] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Verfahren zum Schmelzen von feinteiligen Aluminiumvorstoffen sowie Überprüfung der Übertragbarkeit auf Magnesiumvorstoffe (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30794_-_Abschlussbericht.pdf
- [8] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Ökologische und ökonomische Optimierung des Kupolofen-Schmelz-Prozesses durch den Einsatz von Erdgas/Sauerstoff-Brennern bei gleichzeitig möglicher Feststoffinjektion (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/29359_-_Abschlussbericht.pdf
- [9] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Sandaufbereitung in einer Aluminium-Sandgießerei (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20126_Ohm-Haener.pdf
- [10] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Innovative, materialeffiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss (Abschlussbericht). 2010. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4132.pdf>
- [11] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Neues Koksprodukt zur Verbesserung der Nachhaltigkeit beim Betrieb von Kleinschachtofen (Abschlussbericht). 2012. Verfügbar unter: <http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI0719A.pdf>

- [12] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Optimierung Schachtofen für die Reststoff-Verwertung (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RW0123_-_Abschlussbericht.pdf

- [13] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Innovatives Schrottcleaning für Kupfer-legierungen zur Erweiterung des Einsatzspektrums von Schrotten (Abschlussbericht). 2004. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30232_-_Abschlussbericht.pdf

3.1.3 Ressourceneffizienz bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi

Die Verarbeitung von Kunststoffen erfolgt größtenteils durch das Spritzgießen und Extrusion. Kunststoffe sind leicht und wirtschaftlich zu verarbeiten, so dass sie zunehmend auch klassische Werkstoffe wie Metalle substituieren.¹⁶

Beim Spritzgießen wird der Rohstoff in einem Prozessschritt direkt zum Fertigteil geformt. Der Spritzguss zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der eingesetzten Werkstoffe, der Bauteilgeometrie und -größe aus. Der diskontinuierliche Prozess ist sehr präzise, automatisierbar und besitzt eine hohe Reproduzierbarkeit. Die durch Spritzguss gefertigten Teile sind sowohl im Blick auf die Formteilgeometrie als auch auf Größe und Gewicht flexibel. So können Mikrobauerteile von wenigen Gramm bis hin zu Großteilen mit einem Gewicht von über 100 kg gefertigt werden.¹⁷

Das Spritzgießen erfolgt mit Spritzgießmaschinen. Über den Einfülltrichter gelangt das Kunststoffgranulat in die Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine. Hier wird das Granulat geschmolzen und durch eine rotierende Schnecke zur Spritzeinheit gefördert. Die thermische Energie zum Schmelzen des Kunststoffes wird durch Reibung und elektrische Heizbänder eingebracht. Im Anschluss an den Plastifizierungsvorgang wirkt die Schnecke wie ein Kolben, der eine dosierte Menge durch eine Vorschubbewegung unter hohem Druck in den Hohlraum (Kavität) des Spritzgusswerkzeuges presst und somit das Produkt formt. Das Werkzeug besteht aus mindestens zwei Hälften, die über Aufspannplatten mit der Schließereinheit verbunden sind. Der Schließmechanismus muss den Druck der Schmelze beim Einspritzen aufnehmen und ein Entformen des Werkstücks ermöglichen. In der Regel wird der Mechanismus direkt hydraulisch oder über einen Kniehebel elektrisch oder hydraulisch betrieben. Ein weiteres Fertigungsverfahren zum Urformen von Kunststoffen ist die Extrusion. Hierzu zählen auch die Verfahren Extrusionsblasformen und Thermoformen. Die Extrusion von Kunststoffen ist ein kontinuierlicher Prozess zur Herstellung von Folien, Rohren

¹⁶ Bührig-Polaczek, A.; Michaeli, W.; Spur, G. (2014)

¹⁷ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)

und Profilen. Der Kunststoff wird zur Verarbeitung geschmolzen, in der Düse geformt und anschließend abgekühlt. Über eine angetriebene Schnecke wird das Granulat des Fülltrichters in den Zylinder gefördert. Durch Reibung und die thermische Energie der Heizung wird das Granulat geschmolzen. Die Geometrie der Schnecke verdichtet die Schmelze zusätzlich und fördert sie zum Werkzeug. Im Extrusionswerkzeug wird die Schmelze in der Düse in die gewünschte Geometrie geformt. Das Profil wird anschließend durch eine nachgeschaltete Kühleinheit gekühlt.¹⁸

Die Analyse von mehr als 50 Maßnahmen zur Reduktion des Ressourceneinsatzes bei der Produktion von Produkten aus Kunststoff und Gummi durch verschiedene Fertigungsverfahren zeigten eine Vielzahl von Möglichkeiten auf, die an dieser Stelle zusammenfassend dargestellt sind.

- Einsatz von Messsystemen zur Überwachung und Steuerung der Prozessqualität: Die verfügbaren Projektdokumentationen zeigten, dass im Wesentlichen bildverarbeitende Systeme zum Einsatz kommen mit deren Hilfe Produktparameter (Form, Abmessungen, Gewicht) erfasst werden und auf Basis dessen eine Rückkopplung mit Prozessparametern erfolgt (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie Qualitätssicherung).
- Durchführung von regelmäßigen Maschinenwartungen zur Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie Maschinenverfügbarkeit).
- Einsatz von Simulationswerkzeugen: Der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Optimierung der Geometrie einzelner Maschinenelemente wie beispielsweise der Schnecke und Spritzgusswerkzeugen (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie Einsatz von Prognose- und Simulationssoftware).
- Verbesserung der Prozessführung einzelner Prozessschritte durch Ermittlung von Einflussparametern auf den Prozessschritt: Ermittlung wesentlicher Einflussparameter auf den Materialdurchsatz und Zeitbedarf des Spülvorgangs im Rahmen von Produktwechseln bei der Blasextrusion (siehe

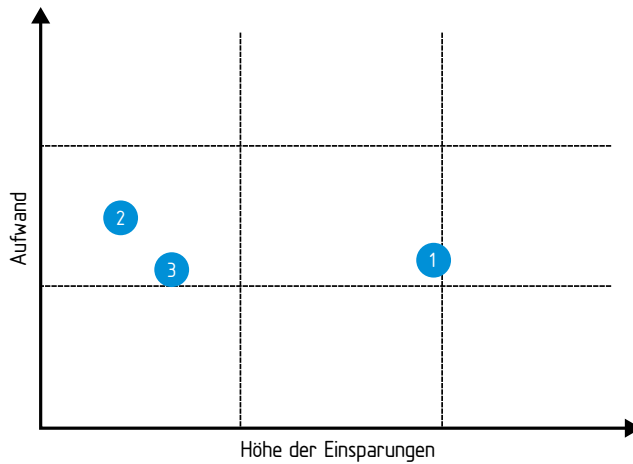
¹⁸ Bührig-Polaczek, A.; Michaeli, W.; Spur, G. (2014)

Tabelle 4, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren, Prozessführung).

- Einsatz von Messsystemen zur Steuerung des Energiebedarfs einzelner Maschinenelemente: Entwicklung eines Messsystems für eine bedarfsgerechte Steuerung von Linearmotoren einer Folienreckanlage (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie bedarfsgerechte Steuerung).
- Isolierung von wärmeleitenden Anlagenbereichen: Zusätzliche bzw. nachträgliche Isolierung von Rohren, Heizelementen und wärmeleitenden Anlagenbereichen zur Minderung der Abstrahlverluste (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie Vermeidung von Wärmeverlusten).
- Erhöhung des Einsatzes von Sekundärmaterial: Vermahlung von produktionsbedingten Angussystemen aus Kunststoff sowie Ausschuss zur Weiterwertung als Sekundärmaterial im Produktionsprozess. Einsatz von Mischweichen zur exakten Bestimmung des maximal zulässigen Anteils an Sekundär-/ Recyclingmaterial im Produktionsprozess (siehe Tabelle 4, Maßnahmenkategorie Wiedereinsatz von Reststoffen/Ausschussmaterial).

Die Maßnahmen zielen insbesondere darauf den Einsatz an Produktionsmaterialien und Energie, insbesondere in Form von Wärme, zu reduzieren. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Maßnahmen erfolgt in Tabelle 4.

Auf Basis der vorhandenen Datenlage konnte nur für drei Maßnahmen eine Quantifizierung des Nutzens erfolgen (siehe Abbildung 8).



1. Regelungssystem für bedarfsgerechte Leistungsabgabe von Linearmotoren einer Folienreckanlage
2. Stoffliche Verwertung vulkanisierter Produktionsabfälle
3. Einsatz von Kunststoffregranulat beim Kunststoffspritzguss

Abbildung 8: Darstellung des Aufwands und Nutzens ausgewählter Maßnahmen zur Verringerung des Ressourcenbedarfs beim Urformen von Produkten aus Kunststoffen und Gummi (Eigene Darstellung)

Linearmotoren, die bei Folienreckanlagen (linearmotorbetriebene Reckanlage) zum Einsatz kommen, werden oftmals im Belastungsmaximum betrieben. Bisher war es nicht möglich den Energiebedarf der Linearmotoren zu regulieren, da Informationen zur tatsächlich benötigten Leistung nicht vorliegen. Die Entwicklung eines sensorlosen Regelungssystems kann den Energieverbrauch der Anlage wesentlich reduzieren (Abbildung 8, Maßnahme 1). Durch die sensorlose Positionsbestimmung der einzelnen Kluppen erfolgt die Ermittlung der Motorströme und Motorspannungen. Auf Basis dieser Daten wird der eingepreßte Strom zu 100 % als Wirkstrom eingesetzt. Somit wird dieselbe Wirkleistung mit weniger Strom erreicht. Für die spezifische Anlage konnte der Energieverbrauch um 250 kW, nahezu um 45 % gesenkt werden. Unter der Annahme von 7.500 Produktionsstunden pro Jahr, ergibt sich eine jährliche Einsparung von 1,4 Mio. kWh/Jahr und Anlage¹⁹.

¹⁹ Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2004a)

Bei der Herstellung von Keilriemen, Kraftbändern und technischen Gummiplatten aus Kautschuk entstehen verfahrensbedingt vulkanisierte Abfälle (Schneidabfälle, Randabschnitte). Diese wurden bisher einer thermischen Verwertung als Sekundärbrennstoff zugeführt oder thermisch beseitigt. Im Rahmen des Vorhabens wurden Möglichkeiten zur werkstofflichen Verwertung untersucht (Abbildung 8, Maßnahme 2). Durch den Aufbau einer technischen Anlage mit Schredder, Zick-Zack-Sichter, Schneidmühle, Feinmühle und Sieben zur Vermahlung der Abfälle ist es möglich ein Mahlgut zu erzeugen, das als Rezyklat in die Produktion wieder eingesetzt wird. Die Anlage kann pro Stunde 70 bis 80 kg an vulkanisierten Abfällen verarbeiten. Durch den Einsatz des Rezyklats können Rohstoffe wie Chloropren, Russ, Weichmacher, Beschleuniger, Alterungsschutzmittel und textile Anteile bis zu 5 % ersetzt werden²⁰.

Die Erhöhung des Regranulates auf bis zu 15 % bei der Produktion von Scheinwerferträgern und Lenksäulenverkleidungen eines Kleinunternehmens erzielte eine monetäre Einsparung von mehr als 250.000 € (Abbildung 8, Maßnahme 3)²¹.

²⁰ Umweltbundesamt (2010)

²¹ Deutsche Materialeffizienzagentur: Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.

Tabelle 4: Maßnahmen bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schnitt)	Stellhebel
Qualitätssicherung (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Implementierung eines Bildverarbeitungssystems (Beleuchtungskörper, Spiegeloptiken) zur Ermittlung von Produktionsfehlern bei Kunststoffflaschen [1]	- Sicherstellung der Produktionsqualität bzw. Reduktion von Ausschuss - Verringerung der Kunststofffeinsatzmenge (ca. 3 % bis 4 % weniger)	Blasextrusion - Qualitätskontrolle (Prozessschnitt)	Material (Kunststoff)
	Aufbau eines geschlossenen Regelkreises zwischen einer Produktionsanlage (Blasextrusion) und der bildverarbeitenden Qualitätskontrolle [2]	- Kontinuierliche Überprüfung der Wanddicke des produzierten Gutes (Kunststoffflasche) und Rückkopplung mit der Produktionsanlage - Reduktion der Kunststofffeinsatzmenge	Blasextrusion - Qualitätskontrolle (Prozessschnitt)	Material (Kunststoff)
Einsatz von Hilfswerk- zeugen (Prognose- und Simulationssoftware) (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Einsatz von Simulationswerkzeugen zur software- gestützten Auslegung von Extruder- und Plastifiziereinheit [3]	- Energetische Optimierung des Spritzgießprozesses (Reduktion des erforderlichen Wärmebedarfs) - Reduktion der Motorleistung der Extruder- und Plastifiziereinheit (Reduktion des Energieverbrauchs)	Spritzgießen - Aufschmelzen der Kunststoffe (Prozessschnitt)	Energie (elektrische Energie, Wärme)
Maschinenverfügbarkeit (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Erhöhung der Anzahl der regelmäßigen Wartungen der Maschine [4]	- Verbesserung der Maschinenverfügbarkeit	Spritzgießen (Prozess)	Organisation

Tabelle 4: Maßnahmen bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Alternative Technologie (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Einsatz eines Mikrowellenaggregates zum Aufheizen von PET-Preforms [5]	– Entwicklung einer skalierfähigen Vorrichtung zum Aufheizen von PET-Preforms – Reduktion des Energieeinsatzes	Blasextrusion – Aufheizen von Preforms (Prozessschritt)	Energie (Wärme)
Optimierung des Werkzeuges (Optimiertes Verfahren)	Verbesserung der Geometrie der Extrusionswerkzeuge durch Vermeidung von Fließkanalbereichen, die mit Schmelze benetzt und schlecht gespült werden können [6]	– Ermöglichung einer hohen und einheitlichen Wandschergeschwindigkeit in Extrusionswerkzeugen für ein verbessertes Spilverhalten – Reduktion des Spülmaterialeinsatzes (Reduktion von Ausschuss) – Verringerung des Zeitbedarfs	Blasextrusion – Spülen (Prozessschritt)	Material (Spülmaterialeinsatz)
Optimiertes Verfahren (Steigerung)	Optimierung des Prozesses der Runderneuerung von LKW-Reifen [7]	– Steigerung des Qualitätsniveaus der runderneuten Reifen – Verwertung des anfallenden Raumehls (Verminderung der Abfallmenge) – Reduktion von nicht regenerierbaren stofflichen Ressourcen – Reduktion des Energieverbrauchs	Vulkanisation: Runderneuerung von LKW-Reifen (Prozess)	Material (Raumehl)
Prozessführung (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Durchsatzvariation (Spülmaterialeinsatz) bei Spülvorgängen bei der Blasfolienextrusion [6]	– Verbesserung der Prozessführung bei Spülvorgängen in Folge von Batchwechseln – Reduktion des Rohmaterialeinsatzes (Reduktion von Ausschuss)	Blasextrusion – Spülen (Prozessschritt)	Material (Spülmaterialeinsatz)
Einsatz alternativer Materialien (Substitution)	Auswahl von Farbbatchen mit großen Farbpigmenten [6]	– Verbesserung der Prozessführung bei Spülvorgängen in Folge von Batchwechseln – Reduktion des Spülmaterialeinsatzes (Reduktion von Ausschuss)	Blasextrusion – Spülen (Prozessschritt)	Material (Farbbatch)

Tabelle 4: Maßnahmen bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Bedarfsgerechte Steuerung (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Entwicklung eines Verfahrens zur sensorlosen Steuerung von Linearmotoren einer Folienreckanlage [8]	– Ermöglichen der Bedarfsgerechten Energieaufnahme der Linearmotoren – Reduktion des Energieverbrauchs	Folienreckanlage (Prozess)	Energie (elektrische Energie)
	Einsatz von drehzahlgeregelten Schraubenverdichtern bei der Druckluftherzeugung [9]	– Reduktion des Energieverbrauchs	Druckluftherzeugung (Prozessperipherie)	Energie (elektrische Energie)
Vermeidung von Wärmeverlusten (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Anbringung von Dämmmaterialien zur Isolierung der Leitungen vom Granulatföhrer zum Granulatbehälter [10]	– Reduktion des Energieverbrauchs, – Reduktion des Wärmeeintrags in die Umgebung	Kunststoffextrusion – Granulatföhrer (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)
	Anbringen einer Abdeckung an die Plastifiziereinheit (elektrische Heizung Spritzgussgranulat) [10]	– Reduktion der Abstrahlverluste (Reduktion des Wärmeeintrags in die Umgebung)	Kunststoffextrusion – Plastifiziereinheit Prozessschritt	Energie (Wärme)
Wiedereinsatz von Reststoffen/Ausschussmaterial (Verwertung (stofflich))	Vermahlen von Produktionsausschuss und Angüssen durch Beistelmöhlen an den Spritzgussanlagen [11]	– Erhöhung des Einsatzes von Sekundärmaterial – Reduktion des Einsatzes von Primärmaterial	Kunststoffextrusion (Prozess)	Abfall (Kunststoff)

Tabelle 4: Maßnahmen bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung /Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Wiedereinsatz von Reststoffen/Ausschussmaterial (Verwertung (stofflich))	Einsatz von Mischweichen [12]	- Ermittlung exakter Mengen zur Zumischung von Mahlgut - Reduktion des Einsatzes von Primärmaterial	Kunststoffextrusion (Prozess)	Abfall (Kunststoff)
	Etablierung eines Verfahrens zur Vermahlung, der in der Produktion von Antriebsriemen anfallenden vulkanisierten Abfällen und Wiedereinsatz des Rezyklates [13]	- Erzeugung eines Rezyklates aus den anfallenden Produktionsabfällen, welches für eine stoffliche Wiederverwertung geeignet ist - Reduktion des Einsatzes von Primärmaterial	Vulkanisation: Herstellung von Antriebsriemen (Prozesskette)	Abfall (Kunststoff)
Nutzung von Abwärme (Kaskadennutzung)	Einsatz eines Wärmetauschers bei einer Druckluft-erzeugungsanlage [9]	- Nutzung der verfügbaren Abwärme - Reduktion des primären Energieverbrauchs	Druckluftherzeugung (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)

QUELLEN TABELLE 4

- [1] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Einsparung von Kunststoffeinsatzmengen bei der Kunststoffflaschenproduktion durch einen Qualitätsregelkreis. Teilprojekt Bildverarbeitungssystem (Abschlussbericht). 2004. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30970_-_Abschlussbericht.pdf

- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Einsparung von Kunststoffeinsatzmengen bei der Kunststoffflaschenproduktion durch einen Qualitätsregelkreis. Teilprojekt Maschinensteuerung (Abschlussbericht). 2004. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30972_-_Abschlussbericht.pdf

- [3] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Entwicklung eines Konzepts zur Auslegung von energetisch optimierten Plastifiziereinheiten. Teilprojekt 2 (Abschlussbericht). 2004. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30366_-_Abschlussbericht.pdf

- [4] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.

- [5] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Entwicklung einer energiesparenden Vorrichtung zur praxisgerechten Aufheizung von PET Preforms mittels Mikrowellenheizung (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/29602_-_Abschlussbericht.pdf

- [6] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Entwicklung von produktionsintegrierten Maßnahmen zur Reduzierung von Umweltbelastungen bei der Blasfolienextrusion (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/31319_-_Abschlussbericht.pdf

- [7] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Herstellung von runderneuten Conti-LKW-Reifen unter Verwendung von hochinnovativem Reclaim-Material (Abschlussbericht). 2013. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/1._bmu_conti_retread_abschlussbericht_final_2014-05-14.pdf
- [8] **Deutschen Bundesstiftung Umwelt:** Sensorlose Regelung für eine elektronisch gesteuerte Folienreckanlage (Abschlussbericht). 2004. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-18168.pdf>
- [9] **Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung:** Drehzahl geregelter Kompressor mit Wärmerückgewinnung (Projektkennblatt). 2007. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=32&page=4
- [10] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:** BEST-Projekt FIA GmbH (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozet-cpgproject_projects%5bcat%5d=2532&tx_exozetcpgproject_projects%5bid%5d=36234&cHash=a8aa74d251d77ca3ab7253744899bfb8
- [11] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.
- [12] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.
- [13] **Umweltbundesamt:** Vermahlung und Verwertung vulkanisierter Produktionsabfälle (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/ab_optiservice.pdf

3.2 Auswertung der Projektdokumentation zu Fertigungsverfahren des Umformens

Nach DIN 8580 ist Umformen das „Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers; dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten“²².

Durch das Umformen erfolgt eine Weiterverarbeitung von massiven Rohteilen, Blechen und Profilen aus Eisen und Nicht-eisen-Metallen. Aber auch Kunststoffe können durch umformtechnische Verfahren weiterbearbeitet werden. Die verschiedenen Verfahren des Umformens können durch folgende Merkmale unterteilt werden:

- Spannungszustand (Druckumformen, Zugdruckumformen, Zugumformen, Biegeumformen und Schubumformen),
- Einsatztemperatur (Kalt-, Halbwarm-, Warmumformung) und
- Produkttyp (Massiv- und Blechumformung).

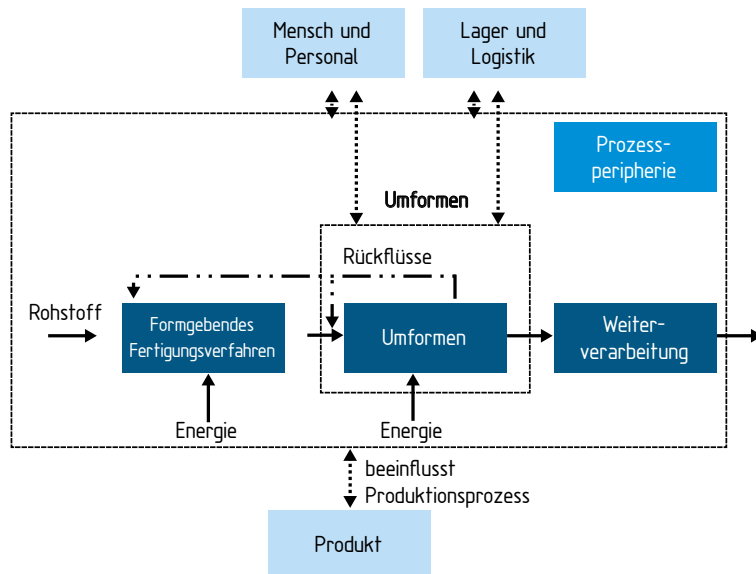


Abbildung 9: Abstraktes Prozessbild des Umformens (Eigene Darstellung)

²² DIN 8580 (2003), S. 4

Für die Betrachtung der Ressourceneffizienz bei umformtechnischen Verfahren ist die Einsatztemperatur und der Produkttyp von Bedeutung. Umformtechnische Prozessketten können als ressourcenschonend eingestuft werden, da sie sich in der Regel durch einen hohen Werkstoff-/ Materialausnutzungsgrad auszeichnen, im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren meist geringe Abfallmengen anfallen und die Prozesse durch eine reproduzierbare Qualität gekennzeichnet sind. Die zum Umformen benötigte Anlagentechnik ist jedoch oftmals durch einen hohen Energieaufwand gekennzeichnet, aufgrund der hohen Prozesskräfte und -leistungen die zum Umformen erbracht werden müssen.

Zur Erhöhung der Ressourceneffizienz bei umformtechnischen Prozessen bestehen nach Neugebauer et al²³ folgende Handlungsfelder:

- Steigerung der Materialausnutzung (Verringerung von Verschnitt)
- Flexibilisierung, d.h. Anwendung von umformtechnischen Prozessen auch auf Bauteile mit geringerer Stückzahl
- Anwendung von Verfahren zur konturennahen Fertigung (near-net-shape und net-shape-Umformprozesse)
- Verbesserung temperierter Prozesse (bspw. Presshärten, Schmieden)
- Reduktion des Zunders bei der Warmumformung
- Umformen ohne Schmiermittel
- Verkürzung der Prozessketten durch Reduktion der Prozessstufen
- Entwicklung von Verfahrenskombinationen und Substitution von Verfahren

Die Anwendung und Übertragung einzelner Maßnahmen aus den Handlungsfeldern ist abhängig vom Produkt das gefertigt wird.

²³ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)

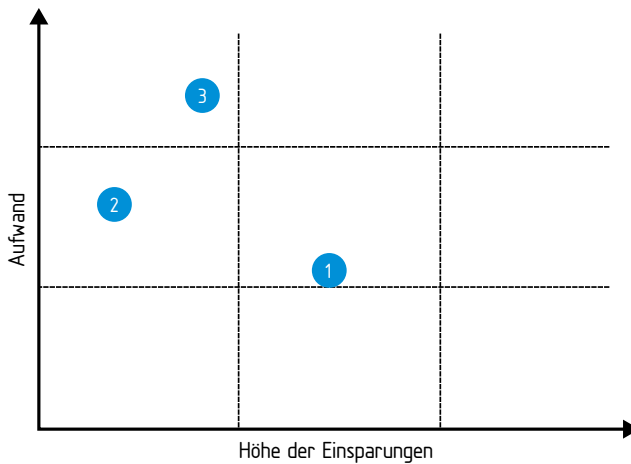
Im Rahmen der analytischen Untersuchung von Förderprojekten zur Steigerung der Ressourceneffizienz konnten folgende Handlungsfelder im Zusammenhang mit umformtechnischen Prozessschritten selbst sowie deren Produktionsumfeld ermittelt werden.

- Verringerung der notwendigen Energie zur Erwärmung der Halbzeuge für die umformtechnische Bearbeitung durch Reduktion der Prozesstemperaturen auf ein notwendiges Minimum, Reduktion von Abstrahlverlusten durch einen direkten Wärmeeintrag (siehe Tabelle 5, Maßnahmenkategorie bedarfsgerechte Steuerung)
- Reduktion des Schmiermittels bzw. Substitution dessen sowie Verbesserung des Verfahrens zur Wiederaufarbeitung (siehe Tabelle 5, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren)
- Einsatz von Wärmetauschern zur Nutzbarmachung der in Stoffströmen enthaltenen Wärmeenergie (siehe Tabelle 5, Maßnahmenkategorie bedarfsgerechte Steuerung)
- Einsatz energiesparender Komponenten in umformtechnischen Maschinen und Anlagen sowie gezieltes Ausschalten einzelner Komponenten bei Nichtproduktion (siehe Tabelle 5, Maßnahmenkategorie bedarfsgerechte Steuerung)
- Reduktion innerbetrieblicher Transportzeiten durch Verkettung von Prozessschritten (siehe Tabelle 5, Maßnahmenkategorie Vereinfachung/Verkürzung von Prozessketten)

Die aus den Förderprojekten ermittelten Handlungsfelder stehen im Einklang mit den Handlungsfeldern nach Neugebauer et al²⁴.

Die in den Fördervorhaben ergriffenen und umgesetzten Maßnahmen sind mit unterschiedlichen Höhen an Material- und Energieeinsparungen sowie Aufwand zur Realisierung (Investitionskosten) verbunden. In der Abbildung 10 erfolgt für die Maßnahmen, die eine entsprechende Datengrundlage aufzeigen, eine Quantifizierung des Nutzens.

²⁴ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)



1. Optimierung einer Ofenanlage (Neubau) zur Erwärmung von Aluminiumstangen für die umformende Bearbeitung
2. Etablierung eines Filterhilfsstoff-freien Pflegeverfahrens für Schmiermittel bei umformenden Fertigungsprozessen
3. Einrichtung eines verketteten Bearbeitungszentrums

Abbildung 10: Bewertung des Nutzens und Aufwands ausgewählter Maßnahmen im Bereich des Umformens (Eigene Darstellung)

Für eine umformtechnische Bearbeitung von Halbzeugen aus Metallen und Nichtmetallen ist es teilweise erforderlich, dass diese vorab erwärmt werden (Warmumformung). Im Rahmen eines Demonstrationsvorhabens erfolgte die Verbesserung des Wirkungsgrades eines Blockheizofens zur Erwärmung von Aluminium für eine anschließende umformtechnische Bearbeitung²⁵, siehe Abbildung 10 Maßnahme 1. Eine Verbesserung der Ressourcennutzung wurde durch die Erhöhung der Anzahl der Brennerdüsen erreicht sowie einer optimierten Positionierung der Düsen zur Oberfläche der Aluminiumstangen. Durch diese Maßnahme wird der Wärmeeintrag in das Aluminium verbessert. Durch die gleichzeitige Anpassung des Ofeninnenraums (Verkleinerung) auf den Bolzendurchmesser (Aluminiumstangen) wird ebenfalls die Energieaufnahme begünstigt. Mit Hilfe der heißen Abgase aus der Hochkonvektionsvorwärmkammer erfolgt zusätzlich die Vorwärmung der Verbrennungsluft. In dem

²⁵ Umweltbundesamt (2008)

spezifischen Projektbeispiel konnte eine Reduktion des Erdgasverbrauchs von 313 kWh/t auf ca. 190 kWh/t erreicht werden. In dem nachfolgenden Prozess der induktiven Erwärmung des Bolzenanfangs konnte in Folge dessen ebenfalls eine Reduktion des Energieverbrauchs (Strom) erreicht werden. Bei einer gleichzeitigen Steigerung der Ausbringungsmenge. Die Gesamtkosten für den Umbau der Anlage beliefen sich auf 542.000 €.

Bei Fertigungsprozessen des Umformens bspw. dem Kaltwalzen aber auch anderen kaltumformenden Verfahren zur Metallbearbeitung kommt es technologiebedingt zu Anreicherungen von fein- und feinstkörnigen metallischen und nicht metallischen Partikeln in den Schmiermitteln (abrasive Rückstände der Arbeitswerkzeuge und hergestellten Produkte). Da die zum Einsatz kommenden Schmiermittel in Kreisläufen gefahren werden, ist eine Abtrennung der eingetragenen Feststoff-Partikel erforderlich. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde der Einsatz eines filterhilfstofffreien Pflegeverfahrens untersucht. Zentrales Element dieses Verfahrens ist die Zyklon-Starkfeldmagnetabscheidung, siehe Abbildung 10 Maßnahme 2.²⁶

Zur Wiederaufnahme der Eigenfertigung von Mittel- und Niedrigpreisprodukten wurde eine Lösung für eine wirtschaftliche Fertigung dieser gesucht, siehe Abbildung 10 Maßnahme 3. Steigende Materialkosten für die Zukaufteile sowie Qualitätsprobleme mit diesen (steigende Nacharbeit) für die Produktion der Mittel- und Niedrigpreisprodukten machten die Wiederaufnahme der Eigenfertigung erforderlich. Durch die Realisierung einer verketteten Produktion mit Handlingsrobotern und die energie- und materialeffiziente Gestaltung der einzelnen Prozessschritte konnte dieses Ziel umgesetzt werden. Die erforderlichen Fertigungsschritte (Abspulen des Rohmaterials vom Coil, Reichten des Blechs, Stanzen, Umformen, induktives Erwärmen, Abschrecken mit gleichzeitigen Härten und Anlassen, Verschweißen von Einzelteilen, Schleifen sowie Beschichtung) werden in einer Linie („in einem Takt“ realisiert). Es erfolgte die Integration der bisher einzeln durchgeführten Prozessschritte in einer im Fertigungstakt verknüpften Produktion. Hierdurch gelang es innerbetriebliche Logistikprozesse zu minimieren

²⁶ Bundesministerium für Bildung und Forschung (2009a)

und die Zwischenlagerung zu reduzieren.²⁷ Bei der Realisierung wurde weiter festgestellt, dass die Taktzeit der Weiterverarbeitung bzw. der Gesamtanlage wesentlich langsamer ist als die Taktzeit der Stanzanlage. Um unnötigen Energieverbrauch in der Stanze durch eine langsame Taktung zu vermeiden, wurde ein zusätzliches Magazin an der Stanzanlage installiert. Nach vollständiger Auffüllung dieses Magazins wird der Motor der Stanzanlage abgeschaltet und die Beschickung der Transfereinheit erfolgt über das Magazin. Die Stanzanlage wird bei einem Leerstand des Magazins wieder zugeschaltet.

²⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013)

Tabelle 5: Maßnahmen bei umformtechnischen Verfahren

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Veränderung des Produktionsmaterials (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Reduzierung der Breite der zu bearbeitenden Coils [1]	- Reduktion von Abfallmaterial - Kostenersparung beim Rohmaterial	Umformende Bearbeitung (Produkt)	Material (Coils)
	Erhöhung der Anzahl der Brennerdüsen und Optimierung der Anordnung dieser [2]	- Verbesserung des Wirkungsgrades des BlockerwärmungsOfens (Reduktion des spezifischen Erdgasverbrauchs) - Erhöhung des Ofendurchsatzes (Steigerung um 25 %)	Erwärmung von Aluminiumbolzen auf Verarbeitungstemperatur für anschließendes Pressdrücken (Prozessschritt)	Energie (Wärme)
Verbesserung der Technologie (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Einsatz eines integrierten 4-Backen-Werkzeugs bei einer Schmiedepresse [3]	- verbesserte Maßhaltigkeit der Schmiedestücke (Reduktion des Aufwands zur Nachbearbeitung)	Schmiedepresse (Prozess)	Anlage/ Prozessraum
	Verwendung von Federfundamenten für eine Schmiedepresse [3]	- Reduktion des Schwingungsübertrags an die Umgebung	Schmiedepresse (Prozess)	Anlage/ Prozessraum
Verbesserung der Maschine (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Anpassung des Ofeninnerenraums an den Bolzendurchmesser [2]	- Verbesserung des Wirkungsgrades des BlockerwärmungsOfens, - Reduktion des spezifischen Erdgasverbrauchs	Erwärmung von Aluminiumbolzen auf Verarbeitungstemperatur für anschließendes Pressdrücken (Prozessschritt)	Anlage/ Prozessraum

Tabelle 5: Maßnahmen bei umformtechnischen Verfahren (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Alternative Technologie (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Einsatz eines neuen Pflegeverfahrens zur Schmier- mittelekreislaufpflege: Kombination eines Hydrozyklons und eines Starkfeldmagnetabscheiders zur Trennung ferromagnetischer Fremdkörper aus Primär- und Sekundärströmströmen [4]	– Vermeidung (Reduktion) des Filterhilfsstoffeinsatzes bei gleichzeitiger Verringerung des Öl-Austrags – Reduktion des Restölgehalts an der abgeschiedenen Feststoffsuspension, – Reduktion der Betriebs- und Entsorgungskosten	Kaltwalzen: Pflege der Schmiermittels (Prozessperipherie)	Material (Schmiermittel)
Bedarfsgerechte Steuerung (Optimiertes Verfahren (Reduktion))	Ausstattung von Vorwärm- und Kühlbecken mit einer Temperaturregelung sowie einem Sekundärkreislauf mit Wärmetauscher und Filtereinheit [5]	– Verbesserung der Badstandzeiten – Energieeinsparung – Reduktion der Betriebskosten	Fertigung von Statoren für Exzenterschnecken- pumpen (Prozesskette)	Wasser, Energie (Wärme)
Bedarfsgerechte Steuerung (Optimiertes Verfahren (Reduktion))	Abschalten elektronischer Motoren einer Stanzanlage, wenn das Magazin (Behälter für gestanzte Teile) voll ist (Anpassung des Maschinentakt) [6]	– Reduktion des Energieverbrauchs	Stanzen (Prozess)	Energie (Elektrische Energie)
Vereinfachung / Verkürzung von Prozess- ketten (Optimiertes Verfahren (Reduktion))	Vertaktung (Verketzung) von Prozessen zur Herstellung von Gartenprodukten in einem Bearbeitungszentrum durch den Einsatz eines Handlingsroboters [7]	– Wirtschaftliche Fertigung von niedrig- und mittel- preisigen Produkten – Reduktion der Zwischenlagerung zwischen den einzelnen Fertigungsschritten – Reduktion des innerbetrieblichen Materialflusses – Materialeinsparung durch Versatzoptimierung beim Stanzen – Energieeinsparung bei der Wärmebehandlung – Vermeidung von Nacharbeit	Komplette Prozessketten zur Fertigung: Abwickeln, Richten, Stanzen, Formen, Induktiverwärmen, Abschrecken, Schweißen, Schleifen, Lackieren	Material (Stanz-Biege- Teil) Energie (elektrische Energie, Wärme)

QUELLE TABELLE 5

- [1] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.
- [2] **Umweltbundesamt:** Umsetzung eines innovativen energieeffizienten Aluminiumbolzenerwärmungsverfahren (Abschlussbericht). 2008.
Verfügbar unter: <http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/ab-broekelmann.pdf>
- [3] **Umweltbundesamt:** Bau einer neuartigen Schmiedepresse. 2006. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/070418_Schlussbericht_Endfassung.pdf
- [4] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Neuartige filterhilfsstofffreie Schmiermittelpflege zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der stahl- und metallverarbeitenden Industrie (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI05167_-_Abschlussbericht.pdf
- [5] **Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung:** Optimierung der Statorenfertigung (Projektkennblatt). 2005. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/suche/dokumente.php?action=search&lang=de&pfm=03&pfy=2000&ptm=02&pty=2015&words=Allweiler&filter_language=de#result.
- [6] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.

- [7] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Innovative getaktete Fertigung von wärmebehandelten Stanz-Biege-Teilen (Abschlussbericht). 2013. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/131113_abschlussbericht-final.pdf

3.3 Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe des Trennens

Die DIN 8580 definiert Trennen als „Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern im Sinne[...], wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird“²⁸.

*Die Verfahrensgruppe des Trennens lässt sich in sechs Untergruppen gliedern: Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden, Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden, Abtragen, Zerlegen sowie Reinigen. Zerteilen und Spanen erfolgt unter mechanischer Einwirkung eines Werkzeugs auf ein Werkstück. Beim Zerlegen wird ein ursprünglich gefügter Körper oder das Entleeren oder Evakuieren von gasförmigen, flüssigen oder körnigen Stoffen aus Hohlkörpern verstanden. Beim Abtragen werden Stoffteilchen von einem festen Körper auf nicht-mechanischem Wege entfernt. Beim Reinigen werden unerwünschte Stoffe oder Stoffteilchen von der Oberfläche eines Werkstücks entfernt*²⁹.

Nach Erhebungen des Fraunhofer ISI³⁰ setzen mehr als 80 % der Unternehmen der Metall- und Elektroindustrie trennende und spanende Verfahren ein. Diese Fertigungsbereiche stellen demnach einen Kernbereich der Produktionstechnik dar. Aber auch in anderen Branchen wie beispielsweise dem Werkzeug- und Formenbau sowie dem Fahrzeugbau und dessen Zulieferindustrie, der Herstellung von Medizin-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie optischer Geräte haben spanende und trennende Verfahren einen Bedeutungszuwachs. In anderen Industriezweigen wie beispielsweise der Möbel- oder Textilindustrie sind trennende Verfahren ein wichtiger Bestandteil des Fertigungsprozesses. So vielfältig wie die Branchen, in den trennenden und spanenden Verfahren zum Einsatz kommen, so vielfältig sind auch die damit verbundenen Werkstoffe die bearbeitet werden: Metalle, Nichteisen-Metalle, Kunststoffe, Holz, Textilien, Papier und Pappe und andere Werkstoffe.

²⁸ DIN 8580 (2003), S. 4

²⁹ Grote, K.; Feldhusen, J. (2014), S. 1431

³⁰ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2006)

Bezüglich der Ressourceneffizienz trennender und spanender Fertigungsverfahren lässt sich allgemein folgendes formulieren. Im Vergleich zu den vorher dargestellten Fertigungsverfahren des Ur- und Umformens können die trennenden und spannenden Verfahren als energiearm bezeichnet werden, wenn man nur den eigentlichen Prozess des Trennens betrachtet³¹. Beim Trennen treten oftmals keine wärmeintensiven Prozessschritte auf. Andererseits sind trennende und spannende Verfahren im Vergleich zu ur- und umformenden Verfahren durch einen hohen Materialabtrag (Materialverlust) in Form von Spänen gekennzeichnet. Eine Verbesserung des Ressourceneinsatzes kann durch die Verringerung des Abfallmaterials erreicht werden beispielsweise durch eine endkonturennaher Herstellung von Halbzeugen (endkonturennahes ur- und umformen) in den formgebenden Prozessen. Wie beim Ur- und Urformen auch bilden die zum Einsatz kommenden Maschinen einen weiteren Stellhebel zur Ressourceneffizienz.

Der Verfahrenshauptgruppe des Trennens ist auch das Reinigen zugeordnet. Reinigungsverfahren dienen dem Entfernen unerwünschter Stoffe (Verunreinigungen) von der Oberfläche von Werkstücken. Im Unterschied zu den spanenden Verfahren stellen die Ressource Wasser und Energie (in Form von Wärme) einen wesentlichen Ansatzpunkt zur Verbesserung der Ressourceneffizienz beim Reinigen dar.

³¹ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)

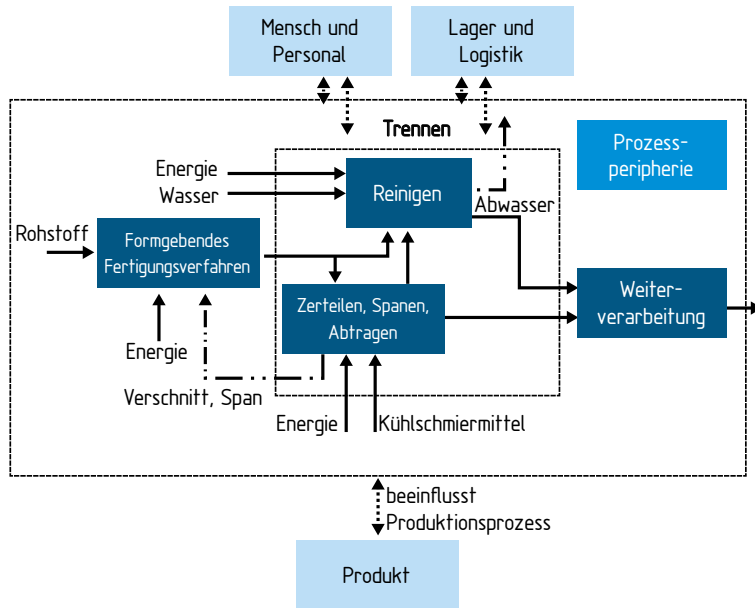


Abbildung 11: Abstraktes Prozessschaubild des Trennens (Eigene Darstellung)

Eine Reduktion der Betriebs- und Hilfsstoffe (bspw. Kühlschmierstoffe) bei trennenden und spanenden Fertigungsverfahren kann durch Substitution, Wiederverwertung oder optimierte Verfahren erfolgen. Eine Verbesserung der Ressourceneffizienz auf Prozessebene im Hinblick auf den Materialeinsatz kann durch Wieder- und Weiterverwendung von Abfallmaterial (Produktionsrecycling von Verschnittmaterial) oder einer Optimierung des Verfahrens erreicht werden. Diese Strategien verfolgen das Ziel einer Reduktion des eingesetzten Produktionsmaterials.

Mit Blick auf den Energieeinsatz kann dieser in trennenden Verfahren folgende Ausprägungen haben: elektrische Energie, Wärme, Kälte oder Druckluft. Zur Reduktion des Energieeinsatzes können Strategien wie Kaskadennutzung, Substitution des Energiemediums und optimierte Verfahren zur Anwendung kommen. Bei Werkzeugmaschinen zum Zerteilen und Spanen entstehen Energieumsätze vor allem durch die Nutzung elektrischer Energie zur Erzielung der gewünschten Gestaltänderung am

Werkstück und für die Peripherie (Kühlschmierstoffaufbereitung, Ablufttechnik).

Zu den technologischen Trends, die einen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch haben können, gehören bei spanenden Werkzeugmaschinen folgende Entwicklungen³²:

- Hochleistungsbearbeitung: Reduzierung der Bearbeitungszeit durch Steigerung der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten
- Trockenbearbeitung/ Minimalmengenschmierung: Reduzierung von bzw. Verzicht auf Kühlschmierstoffe bei der Zerspanung zur Verringerung der Umweltbelastungen und der Produktionskosten
- Hartbearbeitung: Zerspanung, insbesondere Feinbearbeitung, gehärteter Werkstoffe mit definierter Schneide (Drehen, Fräsen, Bohren)
- Direktantriebe: Linear- und Torquemotoren mit hoher Dynamik und einfachem Aufbau zur unmittelbaren Erzeugung linearer und rotatorischer Bewegungen
- Komplettbearbeitung/ Prozesskettenverkürzung: Integration verschiedener Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Verzahnen, Schleifen in einer Maschine zur Fertigbearbeitung des Werkstückes

Darüber hinaus können Maßnahmen ergriffen werden, die einen technologisch-organisatorischen Charakter haben, wie zum Beispiel Maßnahmen zur Verschnittoptimierung. Diese Maßnahmen bewirken indirekt eine Reduktion des Material- und Energieeinsatzes.

Die in den zur Verfügung stehenden Projektberichten enthalten Maßnahmen zur Reduktion des Energie- und Materialeinsatz können zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

- Reduktion und Verzicht auf Kühlschmiermittel durch Umsetzung einer Trockenbearbeitung beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide wie dem Drehen und Bohren

³² Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) (2011)

sowie dem Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide beispielsweise dem Schleifen (siehe Tabelle 6, Maßnahmenkategorie Trockenbearbeitung).

- Einsatz effizienter Anlagen und Anlagenkomponenten und Modifikation von Komponenten und Anlagensteuerungen, die ein Abschalten bzw. bedarfsgerechtes Ansteuern der Funktionsmodule ermöglicht.
- Reduzierung von Materialzugaben beim Zerteilen sowie Einsatz von Software zur Verschnittoptimierung (Verbesserung der Anordnung) (siehe Tabelle 6, Maßnahmenkategorie Verschnittminimierung).
- Entwicklung von neuartigen Reinigungsverfahren mit geringerem Chemikalieneinsatz oder reduzierten Prozesstemperaturen (siehe Tabelle 6, Maßnahmenkategorie optimiertes Verfahren)

Eine ausführliche Darstellung der umgesetzten Maßnahmen erfolgt in Tabelle 6.

Mit Blick auf die Kosten der realisierten Maßnahmen und dem daraus resultierenden Nutzen kann an dieser Stelle nur eine Maßnahme bzw. ein Projekt dargestellt werden. Dies liegt zum einen daran, dass die Anzahl der Maßnahmen (Anzahl der verfügbaren Projektberichte) bei trennenden Verfahren im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren geringer ist und zum anderen die verfügbaren Projektdokumentationen mit Blick auf getätigte Investitionen und daraus resultierenden Nutzen (Quantifizierung der Einsparung) eine geringe Aussagekraft aufwiesen.

Im Zuge der Errichtung eines neuen Fertigungswerkes wurde für die spanende Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen die etablierte Nassbearbeitung durch Trockenbearbeitung substituiert³³. Durch die Realisierung der Trockenbearbeitung steigt der Anteil der Stäube im Maschinenraum. In Folge wurde die Absaugung erhöht. Über einen Nassabscheider wird die Luft von Stäuben gereinigt und über das Hallendach ausgeblasen. Ein weiterer technologischer Unterschied ist, dass die kühlende

³³ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2005)

Wirkung des Schmiermittels durch die Verwendung eines anderen Mediums realisiert werden muss. Hierzu wurden beispielsweise Kälteaggregate an einzelnen Maschinen installiert oder die Luft wird mit Hilfe einer Venturi-Düse abgekühlt. Durch die Trockenbearbeitung konnten folgende Umweltentlastungen erreicht werden: Reduzierung des Einsatz von Prozess-Hilfsmitteln (KSS-Konzentrat) um fast 100 %, Wegfall des Einsatzes von Frischwasser für die KSS-Aufbereitung sowie Einsparung von ca. 400 MWh Energie durch den Wegfall der KSS-Zentralanlage, Pumpen und UF-Anlage. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die reinen Maschinenkosten der Fertigungszentren für beide Verfahren (Nass- und Trockenbearbeitung) eine ähnliche Größenordnung haben. Die Werkzeugkosten bei der Trockenbearbeitung sind jedoch deutlich höher. Durch die Trockenbearbeitung entfallen jedoch die Anlagekosten für die KSS-Zentralversorgung.

Tabelle 6: Maßnahmen für die Verfahrenshauptgruppe Trennen

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Vermeidung von Energieverlusten (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Verlegung des Kompressors und Erneuerung der Sammelleitung sowie Anpassung dieser an den Volumenstrom [1]	- Reduktion des Druckluftniveaus - Einsparung elektrischer Energie	Holzbearbeitung (Prozessperipherie)	Energie (Elektrische Energie)
Produktionsablauf (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Erfassungen von innerbetrieblichen Gründen, die zu einem ungeplanten Maschinenstillstand führen [1]	- Reduktion der ungeplanten Stillstandzeiten - Verbesserung des Produktionsablaufs	Spanende Bearbeitung von Nichtfermetallen (Prozessperipherie)	Anlage / Prozessraum
	Verbesserung des Werkzeugmaschinenmanagements, Erhöhung der Mitarbeiterkompetenz im Umgang mit Material für Produkt und Werkzeuge [1]	- Reduzierung von ungeplantem Ausschuss - Einsparung von Materialkosten	Spanende Bearbeitung von Nichtfermetallen (Prozessperipherie)	Mitarbeiter
Veränderung des Produktionsmaterials (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Reduktion von Randzugaben auf ein notwendiges Minimum [1]	Verringerung des Verschnittmaterials / Erhöhung der Materialausnutzung	Spanende Bearbeitung von Nichtfermetallen (Produkt)	Material (zu spanendes Werkstück)
Einsatz von Hilfswerkzeugen (Software zur Verschnittminimierung) (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Entwicklung eines Algorithmus sowie eines Analyseboots zur Generierung von Online-Schneidplänen (optimale qualitätsabhängige Zuteilung) [2]	- Reduktion des Verschnittmaterials / Steigerung der Ausbringungsmenge, - Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Zuteilung	Zuschnitt von Teilflächen aus Edelmetallblech (Prozessschritt)	Material (Edelstahlblech)
	Einsatz von Software zur Verschnittminimierung [3]	Reduktion von Materialverlusten	Zuschneiden von Stahl / Blechtafeln (Prozessschritt)	Material (Stahl-, Blechtafel)

Tabelle 6: Maßnahmen für die Verfahrenshauptgruppe Trennen (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Trockenbearbeitung (Substitution)	Einführung der Trockenbearbeitung bei der spanenden Bearbeitung von Leichtmetall-Kfz-Rädern [4]	- Verzicht auf Kühlschmierstoffe bei der spanenden Bearbeitung (Einsparung KSS-Emulsion) - Vermeidung von Abwasser - Reduktion des Energieverbrauchs durch den Wegfall von Anlagen zur KSS-Aufbereitung	Bohren, Drehen (Prozessschritt)	Material (Kühlschmierstoff)
Alternative Technologie (Substitution)	Installation von Leitblechen an den Schleifellern einer Schleifanlage zur Erhöhung der Luftzufuhr sowie Installation einer Absauganlage [8]	- Substitution des Nassschleifverfahrens durch Trockenschleifen von Betonware - Reduktion des Wasserverbrauchs	Schleifen von Betonware (Prozessschritt)	Material (Wasser, Luft)
Alternatives Material (Substitution)	Aufdüsen von Zunderpartikeln mit einem Hochdruckstrahl zum Abstrahlen der Zunderdeckschicht auf kalten Warmbandblechen [5]	- Ermöglichung eines chemikalienfreien Entzunderungsverfahrens - Reduktion des Abwassers und Abfall, da das Zunder-Wasser-Gemisch im Kreislauf gefahren werden kann - Reduktion des Energieverbrauchs - Reduktion des Chemikalieneinsatzes	Reinigen-Entzundern (Prozessschritt)	Material (Zunder)
Optimiertes Verfahren (Reduktion)	Reduktion der Aktivbadtemperatur von 79°C auf 60°C und der Spulbäder von 65°C auf ca. 45°C [6]	Reduktion des Energieverbrauchs zum Aufheizen der Spulbäder	Reinigungsanlage (Spulbäder) nach dem Fließpressen (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)
Nutzung der Abwärme (Kaskadennutzung)	Nutzung der Kompressoren- und Maschinenabwärme (Dreh- und Fräsmaschine) für Heizung [7]	Reduktion von Heizkosten durch Einsparung von Heizöl/Gas	Maschinen zur spanenden Bearbeitung (Prozess)	Energie (Heizöl, Gas)
	Nutzung der Abwärme aus den Druckluftkompressoren (Nutzung der Wärme des Öls) zum Beheizen von Spulbädern (45°C bis 60°C) [6]	- Nutzbarmachung der Abwärme der Druckluftkompressoren - Reduktion des Energiebedarfs zum Beheizen der Spulbäder	Druckluftzeugung (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)

QUELLEN TABELLE 6

- [1] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.
- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Produktionsintegrierter Umweltschutz durch Optimierung der Materialausnutzung bei der Edelstahlherzeugung (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30853_-_Abschlussbericht.pdf
- [3] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.
- [4] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Produktionsanlage zur Trockenbearbeitung von Aluminiumrädern und -Teilen mit geschlossener Kreislaufführung der Al-Späne (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_Produktionsanlage_zur_Trockenbearbeitung_von_Aluminiumraedern.pdf
- [5] **Deutsche Bundesstiftung Umwelt:** Bänder und Bleche chemikalienfrei entzundern. 2009. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel29485_341.html
- [6] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:** BEST-Projekt alutec Metallwaren GmbH & Co. KG (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/BEST-Programm/Endbericht_Alutec.pdf

- [7] **Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung:** Flussmanagement bei der Grieshaber GmbH & Co. KG (Projektkennblatt). 2007. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=40&page=19

- [8] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Demonstrationsvorhaben Trockenschleifanlage (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/godelmann_abschlussbericht_10_07_09_endversion-ueberarbeitung_04-04-11.pdf

3.4 Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe des Fügens

Das Fertigungsverfahren des Fügens stellt die vierte Hauptgruppe der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 dar. Das Fügen ist definiert als ein „auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff; dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt“.³⁴

Beim Fügen kann der Zusammenhalt zwischen den einzelnen Teilen durch verschiedene physikalische Effekte erreicht werden: durch Kraftschluss (Schrauben, Klemmen, Verkeilen), Formschluss, durch Adhäsionskräfte eines Zusatzstoffes (Kleben) oder direkte stoffliche Verbindung (Schweißen).

Die Fügeverfahren können auch in mechanische und thermische Fügeverfahren unterteilt werden. Mechanisches Fügen wird als kraft- und formschlüssiges Verbinden durch Umformvorgänge zwischen mindestens zwei Bauteilen definiert. Mittelbare Verbindungen tragen Verbindungselemente wie Nieten, Schrauben, Stifte, Nägel etc. Unmittelbare Verbindungen sind das Verklammern und Verpressen von Oberflächen der Bauteile. Thermisches Fügen wird als stoffschlüssiges Fügen definiert, bei dem die thermische Energie durch Lichtbogentechnik, Strahltechnik, Widerstandserwärmung oder Hochfrequenztechnik in eine Fügestelle eingebracht wird.

Im Rahmen der Produktion kommt den Fügeverfahren, wie Schweißen, Löten und Kleben (im weitesten Sinne Montagetechnik) eine besondere Bedeutung zu. Durch das Fügen der Einzelteile (Endmontage) entsteht die finale Form des Produktes. Die Montage hat im Rahmen der Wertschöpfungsketten einen wesentlichen Stellenwert. Dies hat in der Vergangenheit dazu geführt, das Unternehmen ihre eigene Fertigungstiefe reduziert haben und die interne Wertschöpfung auf die Endmontage der Produkte konzentriert haben. Insbesondere in der Automobilindustrie ist dieser Trend erkennbar bzw. umgesetzt worden. In der Montage selbst bestehen zunehmend die Bestrebungen den

³⁴ DIN 8580 (2003), S. 5

Montageaufwand durch Rationalisierung und eine montagegerechte Konstruktion zu vermindern. Andererseits hat auch die zunehmende Bedeutung der Ressourceneffizienz, insbesondere der Kreislaufführung von Produkten, Komponenten und einzelnen Materialien Auswirkung auf die Fügeverfahren. Denn die Verwendung geeigneter Fügetechniken kann eine Wiederverwendung und -verwertung am Ende des Produktlebenszyklus positiv beeinflussen. Andererseits wächst auch die Bedeutung leistungsfähiger Technologien und Maschinen für die Demontage von Produkten.³⁵

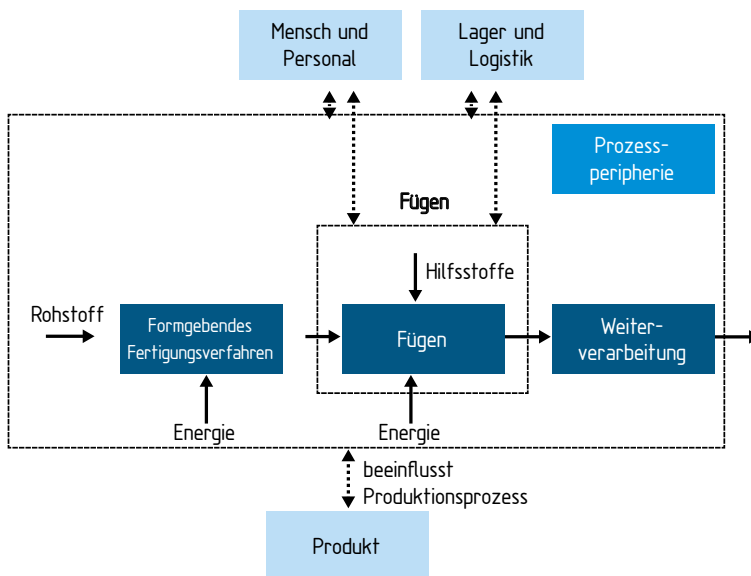


Abbildung 12: Abstraktes Prozessschaubild zum Fügen (Eigene Darstellung)

Im Vergleich zu den formgebenden Verfahren des Ur- und Umformens kommt bei den fügenden Fertigungsverfahren kaum zum zusätzlichen Einsatz von Rohmaterial. Das Ziel von fügenden Verfahren ist die Verbindung von Halbzeugen/Produkten. Die Verbindung wird über den Einsatz von Hilfsstoffen oder Verbindungselementen geschaffen. Hinsichtlich der Resource Material, insbesondere des Produktionsmaterials ist positiv zu erwähnen, das durch die Fügeoperation selbst wenig

³⁵ Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (2014)

oder kein Abfallmaterial entsteht. Das zu fügende Produktionsmaterial kann vielfältig sein (Metalle, Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Holz, Textilien, u.a.) und es können unterschiedliche Produktionsmaterialien miteinander verbunden werden. Mit Blick auf die Fügeverfahren des Schweißens, Lötens und Klebens spielen insbesondere die dafür notwendigen Hilfsstoffe eine wichtige Rolle und geben Ansatzpunkte zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Durch die Anwendung der Strategien „Substitution“ und „optimiertes Verfahren“ können der Einsatz von Betriebs- und Hilfsstoffen bei fügenden Verfahren verbessert werden. Die Strategie der Wiederverwendung hat für Hilfsstoffe bei fügenden Verfahren kaum bzw. keine Bedeutung, da die Hilfsstoffe anders als beim Ur- und Umformen sowie Trennen im Produkt verbleiben bzw. durch den Einsatz der Hilfsstoffe das Fügen erreicht wird.

Die Ressource der Energie kann bei den fügenden Verfahren in Form von elektrischer Energie oder Brennstoff zum Einsatz kommen. Mechanische Fügeverfahren können durch den geringen bzw. nicht erforderlichen Einsatz von Wärme im Vergleich zu Fertigungsverfahren wie dem Ur- oder Umformen bei denen überwiegend ein Wärmeeinsatz notwendig ist als energiearm bezeichnet werden. Eine Ausnahme bilden das Löten und Schweißen, bei denen ein erhöhter Wärmeeintrag erforderlich ist zum Aufschmelzen des Lots bzw. der Schweißzusätze. Eine Reduktion des Energieeinsatzes kann durch eine Optimierung der Anlagentechnik (Einsatz effizienter Komponenten) erreicht werden. Zur Verringerung des Energieeinsatzes bei fügenden Verfahren insbesondere den thermischen Fügeverfahren wie dem Schweißen können Strategien der Substitution oder optimierte Verfahren zur Anwendung kommen um beispielsweise die Prozesstemperatur zu senken. Die Strategie der Kaskadennutzung spielt eine untergeordnete Rolle.

Betrachtet man nur thermische Fügeverfahren wie das Schweißen, so kann der Energieverbrauch durch folgende allgemeine Ansatzpunkte reduziert werden³⁶:

³⁶ Wilden, J.; Weise, C. (2010)

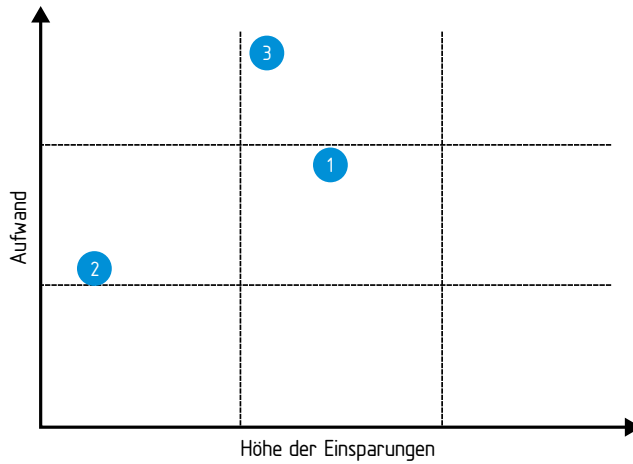
- Einsatz von neuartigen Zusatzstoffen, die bei niedrigeren Temperaturen schmelzen als herkömmliche Schweißzusätze,
- Verringerung des Schmelzbadvolumens,
- Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit,
- Reduzierung bis Minimierung der Schweißspritzer.

Die Auswertung der verfügbaren Projektdokumentationen zeigten folgende übergeordneten Maßnahmen zur Material- und Energieeinsparung insbesondere bei der Verwendung von Klebstoffen und Leimsystemen auf (Substitution und optimierte Verfahren) sowie in der Prozessperipherie der Unternehmen:

- Verringerung der Einsatzmenge von Hilfsstoffen beispielsweise Klebstoffen und Leimen durch mengengenaues Auftragen des Klebers (Verkleben von Papier und Holz),
- Substitution von Leim- und Klebstoffverfahren: Einsatz von Kaltleim und -klebstoffverfahren (Reduktion des Wärmeeintrags in das Produkt; Reduktion der verfahrensbedingten Energie),
- Einsatz energieeffizienter Komponenten/Anlagen in der Prozessperipherie (Beleuchtung, Druckluft, Abluftanlage).

Eine prägnante Darstellung der ergriffenen Maßnahmen zur Verbesserung des Ressourceneinsatz in Verbindung mit Verfahren des Fügens erfolgt in Tabelle 7.

Nachfolgend werden einzelne Fördervorhaben detaillierter dargestellt insbesondere mit Bezug auf Aufwand und Nutzen der durchgeführten Aktivitäten (siehe Abbildung 13).



1. Entwicklung und Einsatz eines wasserbasierten lösemittelfreien Klebers
2. Einsatz spezieller Bearbeitungswerkzeuge im Bereich des Buchbindens
3. Anwendung pneumatische Trockenbeleimung

Abbildung 13: Bewertung des Nutzens und Aufwands ausgewählter Maßnahmen im Bereich des Fügens (Eigene Darstellung)

Im Rahmen eines Projektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wurden Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Verwendung von Heißkleber beim konventionellen Buchbinden sowie der Reduzierung von weiteren Umweltbelastungen, die sich aus der Verwendung des Heißklebers ergeben untersucht³⁷. Hierbei gelang es einen Kaltleim auf Dispersionsbasis (wasserbasierte lösemittelfreie Kleber) zu entwickeln (Abbildung 13, Maßnahme 1). Dieser muss allerdings in einem geschlossenen System aufgetragen werden um das Abdampfen der wässrigen Phase zu vermeiden. Hierzu wurde im Rahmen des Projektes eine Dosier- und Auftragseinheit entwickelt, die die Klebstoffmenge und dessen Auftragung automatisch an Format und Dicke der zu bindenden Druckerzeugnisse anpasst. Durch einen Prototypen einer neuen Bindeanlage (Abbildung 13, Maßnahme 2) konnte eine Reduzierung des Energieverbrauchs (elektrische Energie) durch Verwendung des Kaltleims

³⁷ Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2004b)

gegenüber dem konventionellen Heißeleims um 130 kWh pro Tag nachgewiesen werden.

Ebenfalls zur Reduktion von Emissionen (Reduktion von Formaldehydemissionen um 78%) und dem Bindemittleinsatz (Reduktion um 10%) führte die Integration der sogenannten Trockenbeleimung in eine bestehende Produktionsanlage für Faserplatten (Abbildung 13, Maßnahme 3)³⁸. Neben den ökologischen Vorteilen des Verfahrens konnte im Rahmen des Fördervorhabens die betriebliche Produktion im großtechnischen Maßstab erfolgreich demonstriert werden. Die getätigten Investitionen in die Anlage und die damit verbundene Reduktion des Rohstoffeinsatzes stehen in keinem wirtschaftlichen Verhältnis. Dennoch stellt die Anlage zur Trockenbeleimung einen Vorteil dar, da durch diese die Emissionsgrenzwerte in dem Unternehmen eingehalten werden können und so auf die Installation eines sonst notwendig gewordenen Bio-Abgaswäschers verzichtet werden konnte.

³⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009b)

Tabelle 7: Maßnahmen für die Verfahrenshauptgruppe Fügen

Maßnahmenkategorie	Maßnahme	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Vermeidung von Energieverlusten (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Verlegung des Kompressors und Erneuerung der Sammelleitung sowie Anpassung dieser an den Volumenstrom [1]	– Reduktion des Druckluftniveaus – Einsparung elektrischer Energie	Holzbearbeitung (Prozessperipherie)	Energie (Elektrische Energie)
Qualitätssicherung (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Festlegung von Prüfmethoden innerhalb des Fertigungsprozesses (Prüfintervalle, -merkmale, -dokumente) [1]	– Senkung der Ausschussquote / Erhöhung der Gütfälle – Reduktion von Materialverlusten	Verleimen von Holz (Prozessschritt)	Material (Holz)
Reduktion der Materialauswahl (Substitution)	Reduzierung der zur Anwendung kommenden Leimsysteme [1]	– Reduzierung des Arbeitsaufwands zum Vorrichten der Anlagen durch den Leimwechsel – Verringerung der Zeit zum Maschineneinrichten	Verleimung von Holzstücken (Prozessschritt)	Material (Leim)
Einsatz alternativen Fertigungsmaterials (Substitution)	Entwicklung und Erprobung der Zusammensetzung eines wasserbasierten lösemittelfreien Klebers [2]	– Ersetzen des Schmelzklebers durch einen Kaltleim auf Dispersionsbasis – Reduktion des Energieeinsatzes durch Wegfall des Aufschmelzens des Schmelzklebers; – Reduktion von Emissionen	Buchbinden – Auftragen des Kleber (Prozessschritt)	Material (Kleber)
Verbesserung der Technologie (Optimiertes Verfahren (Steigerung))	Anwendung eines Kaltleimes statt eines Heißleimverfahrens [2]	– Verbesserung der Prozessqualität – Energieeinsparung (Wärme)	Verleimen von Holz (Prozessschritt)	Material (Kleber)
	Bearbeitung des Buchrückens mit speziellen Fräswerkzeugen [2]	– Verbesserung des Klebstoffauftrags bei gleichzeitiger Reduktion der erforderlichen Klebstoffmenge – Verbesserung der Auffaserung der einzelnen Blattkanten	Buchbinden – Auftragen des Kleber (Prozessschritt)	Bearbeitungswerkzeug
Alternative Technologie (Substitution)	Anwendung des Verfahrens zur pneumatischen Trockenbeimischung im großtechnischen Maßstab [3]	– Ersetzen der Nassbeimischung durch die ökologisch verträglichere Trockenbeimischung – Reduzierung von Formaldehydemissionen – Reduzierung des Bindemittelseinsatzes (Leim)	Herstellung von MDF- und HDF-Platten (Prozesskette)	Material (Leim)

QUELLEN TABELLE 7

- [1] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.

- [2] **Deutsche Bundesstiftung Umwelt:** Entwicklung eines Energie sparenden Verfahrens zum maschinellen Klebebinden (Projektkennblatt). 2004. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/PDF-Files/A-18926.pdf>

- [3] **Bundeministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Trockenbeleimung als umweltschonendes Verfahren für die Herstellung von Holzfaserplatten (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20091__EGGER.pdf

3.5 Oberflächenbehandlung / Beschichten

Unter Beschichten wird in der Fertigungstechnik das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus einem formlosem Stoff auf die Oberfläche eines Werkstückes verstanden.³⁹ Das Beschichten beziehungsweise die Oberflächenbehandlung besitzt eine hohe technische Bedeutung, da sie eine Funktionstrennung von Volumen und Oberfläche ermöglicht. So kann beispielsweise der Bauteilkörper hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit optimiert werden, während durch die Oberflächenbehandlung das Bauteil beispielsweise vor Korrosion und Verschleiß geschützt werden kann. Beschichtungen erfüllen dabei eine Reihe von Aufgaben darunter wie eben angemerkt der mechanische Schutz (Verschleiß) sowie Barriere-Funktionen (wie Korrosionsschutz, Wärmeisolation) aber auch ästhetische/optische Funktionen (wie Dekoration, Reflexion) sowie elektrische Funktionen (bspw. Leitfähigkeit) und weitere Funktionen (bspw. Bearbeitungsfähigkeit).⁴⁰

Stark verallgemeinert lässt sich der Prozess des Beschichtens in folgende Phasen unterteilen. Der Prozess beginnt mit der Vorbehandlung, in der die Oberfläche durch chemische und mechanische Bearbeitung gereinigt und die aktive Oberfläche vergrößert wird. Daran schließen sich Zwischenschritte wie Spülung und Trocknung an. Im weiteren Prozessverlauf erfolgt die Aufbringung der Schichten sowie weitere Spül- und Trockenschritte. Der Prozess schließt mit der Nachbehandlung beziehungsweise -bearbeitung (bspw. Polieren).

Für die Aufbringung von Beschichtungen existiert eine Vielzahl von Verfahren, die häufig nach dem Ausgangszustand des aufzubringenden Stoffes in Beschichten aus dem flüssigen (bspw. Lackieren), gasförmigen (bspw. CVD, PVD), gelösten (bspw. Galvanisieren) oder festen (bspw. Pulverbeschichten) Zustand unterschieden werden.⁴¹ Wobei zunehmend auch kombinierte Beschichtungen, die mit verschiedenen Verfahren aufgetragen werden, an Bedeutung gewinnen.⁴² Das Spektrum beschichteter Werkstücke reicht von Kleinteilen wie Schrauben über

³⁹ DIN 8580 (2003), S.4

⁴⁰ Grote, K.; Feldhusen, J. (2014)

⁴¹ vgl. ebenda

⁴² Dietz, Dr. Andreas (2012)

Armaturen, Bauteile für Fahrzeuge bis hin zu Walzen. Die Kunden für behandelte Werkstücke finden sich daher in zahlreichen Industrien.

Auch hinsichtlich der Ressourceneffizienz kommt der Oberflächenbehandlung eine wichtige Rolle zu. Durch den Einsatz von Beschichtungen und die konstruktive Berücksichtigung in der Produktentwicklung kann die Lebensdauer von Bauteilen wie etwa bei Karosserien deutlich verlängert und der Verbrauch an Rohstoffen gesenkt werden. Verschleißbeständige Beschichtungen und reibungsmindernde Schichtsysteme reduzieren die Notwendigkeit von Trenn- und Schmiermitteln. Auch hinsichtlich der Senkung des Energieverbrauchs für Beleuchtung oder Raumklimatisierung können Oberflächenbeschichtungen einen wertvollen Beitrag leisten.⁴³

Andererseits nimmt die Herstellung von Beschichtungen durch ihren hohen Energie- und Wasserverbrauch, den Verbrauch an Rohstoffen, Emissionen in Oberflächen- und Grundwasser sowie Abfällen auch verschiedene Ressourcen in Anspruch.

Im Folgenden sollen verschiedene Ansatzpunkte und Maßnahmen für die Reduktion der Ressourceninanspruchnahme in der Oberflächenbehandlung dargestellt werden.

3.5.1 Ansatzpunkte zur Senkung der Ressourcenbeanspruchung in der Oberflächentechnik

Um die Inanspruchnahme von Ressourcen in der Oberflächenbehandlung durch Beschichten zu reduzieren, setzen Maßnahmen häufig an folgenden Punkten (siehe Tabellen 8 und 9) im Prozess an:

- Prozesschemikalien: Hierbei geht es um die Reduktion der Menge der eingesetzten Chemikalien aber auch um die Substitution einzelner Stoffe durch weniger gefährliche Stoffe. Ziel ist es hierbei Emissionen (bspw. in Luft und Wasser) und Abfälle zu vermindern beziehungsweise in ihrer Zusammensetzung zu verändern.

⁴³ Umweltbundesamt (2005)

- Rohstoffe/Material: In den Beschichtungsprozessen entstehen an verschiedenen Stellen Materialverluste beispielsweise in Form von zu hohen Schichtdicken oder Overspray. Maßnahmen in diesem Bereich beabsichtigen diese Verluste zu vermeiden und so den Einsatz der Rohstoff-/Materialmenge zu senken.
- Energie: Weitere Maßnahmen setzen am Energieverbrauch an und zielen wiederum auf die Reduktion des Energieverbrauchs oder auf die Substitution der Energieressource.
- Wasser: Maßnahmen hinsichtlich der Ressource Wasser haben zum Zweck die benötigte Wassermenge insgesamt oder insbesondere den Einsatz von Frischwasser im Prozess zu reduzieren. Des Weiteren soll die Senkefunktion der Ressource Wasser weniger in Anspruch genommen werden (bspw. durch Emission von Prozesschemikalien).

Da für das Beschichten eine Vielzahl verschiedener Verfahren existiert, lassen sich die oben genannten Ansatzpunkte bestimmten Phasen des Beschichtens nicht allgemein zuordnen, sondern können nur verfahrensspezifisch in den einzelnen Prozessschritten verortet werden. Im Folgenden sollen die Maßnahmen dargestellt werden, die in den analysierten Projektberichten dokumentiert wurden. Auswertbar waren insbesondere die Maßnahmen zu den Verfahren „Lackieren“ sowie „Galvanisieren“. Zu den Verfahren „Drucken“ und „Feuerverzinken“ waren nur einzelne, sehr allgemein beschriebene Maßnahmen verfügbar – diese sollen nachfolgend nicht weiter betrachtet werden.

3.5.2 Maßnahmen im Prozess Lackieren

Insgesamt gingen in die Auswertung für den Prozess des „Lackierens“ 89 Maßnahmen ein. Die nachfolgende Tabelle 8 fasst die genannten Maßnahmen und jeweiligen Ansatzpunkte zusammen. Insbesondere im Bereich alternativer Verfahren für die Vorbehandlung, der Lackaufbringung selbst sowie für das Trocknen/Härten weist die Maßnahmenliste jedoch Lücken auf. Dies lässt sich auf die große Variation in der Beschichtungstechnik zurückführen. Die genaue Ausprägung der Prozessgestaltung und damit auch der Möglichkeiten der Ressourcenschonung hängt

stark von den Qualitätsvorgaben, dem Werkstückspektrum, den eingesetzten Lack(-systemen) etc. ab. Für eine weiterführende Betrachtung von alternativen Verfahren in den einzelnen Phasen kann an dieser Stelle beispielsweise auf die Merkblätter der „Besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung“ verwiesen werden.⁴⁴

⁴⁴ unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken/sevilla-prozess/bvt-download-bereich>

Tabelle 8: Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Vermeidung von Energieverlusten (Optimiertes Verfahren)	Verbesserung der Ofenisolierung bei Einbrennöfen [1]	Vermeidung von Wärme- / Energieverlusten	Trocknen / Härten	Energie
	Verbesserung der Isolation der Armaturen / Leitungen [12] für die Heißwasserzufuhr [2]	Vermeidung von Wärme- / Energieverlusten	Prozessperipherie	Energie
	Untersuchung und Behebung von Leckagen in Druckluftleitungen [14]	Vermeidung von Energieverlusten	Prozessperipherie	Energie
	Beheizte Becken nachts abdecken, bessere Wärmedämmung [2]	Einsparung von Energie zur Wassererwärmung	Vorbehandlung	Energie
Bedarfsgerechte Dimensionierung und Steuerung von Energieverbrauchern (Optimiertes Verfahren)	Umstellung auf effiziente Leuchten und bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung [12] [19]	Anpassung der Beleuchtung an die Anforderungen des jeweiligen Arbeitsgangs	Prozessperipherie	Energie
	Installation von Umwälzpumpen mit angepasster Leistung [2]	Einsparung von Energie in der Heizanlage	Prozessperipherie	Energie
	Heißwasser Pumpe nachts abstellen [2]	Vermeidung von Energieverlusten	Prozessperipherie	Energie
	Absenken / Anpassen der Badtemperaturen [2]	Einsparung von Energie zur Erwärmung der Bäder	Applikation / Vorbehandlung	Energie
	Energiesparschaltung für die Luftleistung in Verbindung mit frequenzgeregelten Ventilatoren für Zu- und Abluft [12] [13] Integration eines bedarfsorientierten Management der Luftleistung [11]	Automatische / Bedarfsgerechte Steuerung des Frischluftanteils und Einsatz der Ventilatoren in der Kabine Anpassung an die Anforderungen des jeweiligen Arbeitsgangs	Applikation Trocknen / Härten	Energie

Tabelle 8: Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahme	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Bedarfsgerechte Dimensionierung und Steuerung von Energieverbrauchern (Optimiertes Verfahren)	Installation eines drehzahlregulierten Kompressors mit Abwärmenutzung für die Drucklufterzeugung [14]	Bedarfsgerechte Steuerung der Drucklufterzeugung Nutzung von Abwärme	Prozessperipherie	Energie
	Nutzung der Abwärme des Pulvertrockners für Hallenheizung [2]	Einsparung von Energie für die Beheizung	Prozessperipherie	Energie
Nutzung der Abwärme (Kaskadennutzung)	Auskopplung der Energie aus TNV über Rekuperator (Auslegung als Rohrbündeltauscher direkt hinter TNV), Weiterleitung der erwärmten Luft über Isolierschläuche [8]	Nutzung der heißen Abluft der thermischen Nachverbrennung (TNV) für die Vorwärmung der Brennerluft, zum Beheizen der Trocknungsstraße bei der Fasslackierung + Hallenheizung	Thermische Nachverbrennung Trocknen Prozessperipherie	Energie
	Nutzung des Energiegehaltes der Lösemittel (Vernetzung der Energieströme) [3] [4]	Erfassung der Lösemittel-Emissionen und Nutzung der Energie zur Deckung des Wärmebedarfes der Pressen (zu 23 %)		
	Zweistufiger, ölbeförderter Warmlufterzeuger mit Luft/Luft-Wärmetauscher [15]	Erhöhung des feuertechnischen Wirkungsgrades Reduktion des Energiebedarfs	Prozessperipherie	Energie (b1)
	Installation eines Abgas- / Wasser-Wärmetauschers [16] Einspeisung der Wärmeenergie in einen 4.000 Liter Pufferspeicher [16]	Abwärmenutzung des Brennofens Wärmenutzung für Büro, Lager und Werkstätten	Prozessperipherie	Energie
	Installation eines Kreuzstromwärmetauschers [18]	Reduktion der Betriebskosten	Lackieren	Energie

Tabelle 8: Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Vereinfachung / Verkürzung von Prozessketten (Optimiertes Verfahren)	Integration von Prozessschritten: Austausch der Spritz- und Trockenkabinen der Lackieranlage durch eine kombinierte Kabine [12] [15]	Einsparung von Energie	Lackieren	Energie
	Nutzung von Solarenergie zur Bereitstellung der benötigten Prozesswärme [20]	Senkung der Betriebskosten / des Fremdenenergiebedarfs	Prozessperipherie	Energie
	Installation eines Gasflächenbrenners statt wie bisher eines Gasbläsebrenners zur direkten Luftherhitzung [12] [13] [17]		Lackieren	Energie
Änderung der Energiebereitstellung (Substitution)	Einsatz eines Brennerkessels für die Warmwasserbereitstellung (nahezu vollständige Nutzung des Brennstoffs) [11]	Optimierung der Werkstattbeheizung	Prozessperipherie	Energie
	Beheizung der Werkstatt mit Deckenstrahlplatten [11]	Optimierung der Werkstattbeheizung (Senkung des Energiebedarfs)	Prozessperipherie	Energie
Einsatz alternativer Lackschichthärtungsverfahren (Substitution)	Entwicklung und Einsatz einer neuen Ultraviolett-(UV)-Technologie für Lackschichten [6] Entwicklung eines 3D-UV-Aggregats [6]	Bereitstellung von umweltfreundlichen, ressourceneffizienten UV-Lacke für 3D-Objekte Reduktion VOC-Emissionen (Verzicht auf Lösungsmittel) Energieeinsparung Materialeinsparung (geringere Schichtdicken) Schadstoffreduktion (Ersatz der Zinkphosphatierung)	Lackieren	Energie Material

Tabelle 8: Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung /Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Einsatz alternativer Lacke (Substitution)	Einsatz wässriger Systeme (u.a. bei Decklack) [9]	Substitution der Lacksysteme	Lackieren	Material (Lack)
	Umstellung der Grundierung von VOC-basierten auf wässrige Systeme [9]	Senkung der VOC-Emissionen		
	Entwicklung eines neuen wasserverdünnbaren Strukturlacksystems [7]	Reduktion des Lösemittelanteils von 30 % auf 5 %	Lackieren	Material (Lack)
	Entwicklung / Formulierung neuer UV-Lacke mit 100 % Festkörper [6]	Reduktion Trockenschichtdicke bei gleichen Qualitätsmerkmalen	Lackieren	Material (Lack)
	Einsatz von Epoxycrylatharz im UV-Lack [6]	Eisenphosphatierung statt Zinkphosphatierung des Untergrunds Materialeinsparung		
	Formulierung eines neuen Holzlacks, der sowohl für die Grundierung als auch für Zwischen- und Endschrift verwendet werden kann [5]	Erreichung der gleichen VDA-Wechselbeständigkeit (Korrosionsprüfung) von UV-Lack auf eisenphosphatiertem wie auf zinkphosphatiertem Untergrund Anzahl von benötigten Lacken reduzieren Materialeinsparung	Lackieren	Material (Holzlack)
	Einsatz festkörperreicher Lacksysteme [20]	Reduktion des Lösemittelanteils / der Emissionen	Lackieren	Material (Lack)
	Einleitung der Abgase des Trockenofens in die TNV im Rahmen einer Metallfässer-Wiederaufbereitung [8]	Lösemittel aus Lacken vollständig verbrennen Vermeidung der Abgabe von Lösemittelemissionen	Trocknen	Material (Lösemittel)

Tabelle 8: Maßnahmen im Prozess Lackieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahme	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stielhebel
Kreislaufführung und Rückgewinnung von Lacken und Chemikalien (Wiederverwendung)	Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage Anpassung der Vorbehandlung [20]	Rückgewinnung von Lacken aus der Abluft (Lackoverspray) Reduktion des Materialbedarfs	Trocknen	Material (Lack)
	Etablierung von geschlossenen Reinigungskreisläufen (Pistolenwaschautomat, Destillation) [9]	Lösemittelnrückgewinnung Einsparung von Reinigungslösemittel Senkung der VOC-Emissionen	Nachbehandlung	Wasser Material (Lösemittel)
	Ganzheitliche Flutlackierung [5]	Materialdefizientere Beschichtung von Holz Materialeinsparung Energieeinsparung Reduktion der Lösemittlemissionen	Lackieren	Material (Lack, Lösemittel) Energie
Einsatz materialverlustarmer / -freier Verfahren (Substitution)	Einsatz einer Kombination „Spritzkabinen mit Trockenabscheidung“ anstelle der ehemals getrennten Spritzkabine und des Trockenofens [13]	Vermeidung der energie- und materialintensiven Lackoverspray-Auswaschung Reduktion des Energie- / Materialverbrauchs	Lackieren	Material (Lack) Energie
Modifizierung von Lackierverfahren (Optimiertes Verfahren)	Optimierung von Prozessparametern (Lackmassenström, Spritzluftdruck, Winkel, Abstand, Strahlform) [3]	Lackeinsparung durch Schichtdicken- und Prozessoptimierung Reduzierung des Lackeinsatzes Reduzierung des Materialeinsatzes	Lackieren	Material (Lack)
	Optimierung der Skids für die Pulverlackierung [2]	Genauere Steuerung der Skids Reduzierung des Materialeinsatzes	Lackieren	Material (Lack)
	Einsatz einer Zentrifuge zur Lackschlamm-entwässerung [10]	Rückgewinnung des Wassers	Reinigung	Wasser

QUELLEN TABELLE 8

- [1] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Energie- und Stoffstrommanagement bei der Beschichtung von H4-Lampen mit Abdeckfarbe (Endbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/BEST-Programm/Endbericht_Osram.pdf

- [2] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Energiestromanalyse bei einem Produzenten von Landmaschinen (Endbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozetcpgproject_projects%5Boffset%5D=50&tx_exozetcpgproject_projects%5Bsearch%5D=1&tx_exozetcpgproject_projects%5Bcat%5D=2398&tx_exozetcpgproject_projects%5Bid

- [3] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Energie- und Stoffstromanalyse beim Lackieren von Zerteilen für Fahrzeuginnenräume (Endbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozetcpgproject_projects%5Boffset%5D=50&tx_exozetcpgproject_projects%5Bsearch%5D=1&tx_exozetcpgproject_projects%5Bcat%5D=2398&tx_exozetcpgproject_projects%5Bid

- [4] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Energie- und Stoffstromanalyse bei der metallisierenden Papierbeschichtung (Endbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/BEST-Programm/Endbericht_Schoeller___Hoesch.pdf

- [5] **Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU):** Gesamtheitliche Flutlackierung zur Steigerung der Ökologie- und Ökonomieeffizienz bei der industriellen Holzbeschichtung (Kurzfassung). 2005. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel26003_341.html

- [6] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Umweltfreundliche, ressourceneffiziente UV-Lacke für 3D-Objekte (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RC0001A_-_Abschlussbericht.pdf

- [7] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi):** Wasserverdünnbares 2K-Strukturlacksystem AQUAPUR Strukturlack (Kurzfassung). Verfügbar unter: <http://bit.ly/1G3y1rD>

- [8] **Umweltbundesamt (UBA):** Lösemittelreduktion im Lackierprozess durch neuen, energieautarken Trocknungsprozess (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Loesemittelreduktion_im_Lackierprozess.pdf

- [9] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Prozessorientierte Stoffstromanalyse in der Herstellung von elektrischen Lampen und Leuchten (insbesondere beim Lackieren) bei der Zumtobel Staff GmbH & Co. KG (Projektkennblatt). 2004. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA_0905_RKB_275_Zumtobel.html

- [10] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Prozessorientierte Stoffstromanalyse in einer Lohnlackierung bei Uffmann Lackierbetrieb GmbH aus Bielefeld (Projektkennblatt). Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA_0411_RKB_Uffmann.html

- [11] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Berndt KG – Lackieranlage und Werkstattbeheizung (Projektkennblatt). 2008. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=31&page=4

- [12] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Diebenau KG – Energiesparende Lackieranlagen (Projektkennblatt). 2007. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=31&page=4
- [13] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Autohaus Süderelbe/Tobaben – Kombinierte Spritz- und Trockenkabine (Projektkennblatt). 2008. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=31&page=4
- [14] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Milan & Mc Murray GmbH – Lackieranlage, Druckluft- und Absaugtechnik (Projektkennblatt). 2005. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/index.html?type=31&page=9
- [15] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Renault Niederlassung Hamburg – Lackieranlage (Projektkennblatt). 2008. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=31&page=4
- [16] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
K.-Peter David Betriebsverpachtung – Wärmerückgewinnung (Projektkennblatt). 2007. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/index.html?type=50&page=55
- [17] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Die Jürgen Schröder Autolackierbetriebe oHG – Gasdirektbeheizung (Projektkennblatt). 2008. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=36&page=3
- [18] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Stephan Bartling Lackierungen – Kombinierte Spritz- und Trockenkabine (Projektkennblatt). 2006. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=31&page=8

- [19] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):**
Petschallies Sasel GmbH – Energiesparende Lackieranlage (Projektkennblatt). 2006. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/index.html?type=31&page=9

- [20] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich.

3.5.3 Maßnahmen im Bereich des Galvanisierens

Neben Lackieren, Eloxieren sowie Feuerverzinken stellt das Galvanisieren eines der häufigsten und wichtigsten Beschichtungsverfahren dar. Galvanische Abscheideverfahren sind aufgrund der wesentlichen Prozessparameter (Prozessspannung, Gleichstrommenge, Prozesstemperatur etc.) mitunter sehr energieintensiv. Weitere Schwerpunkte von Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Galvanik konzentrieren sich auf die verbesserte Rückgewinnung sowie die Substitution von Prozesschemikalien und Materialien (Metallen), Reduktion des Wasserverbrauchs und der Inanspruchnahme der Senkenfunktion von Wasser.⁴⁵

Die Behandlung von metallischen und nichtmetallischen Oberflächen kann durch chemische und elektrochemische Vorgänge erfolgen. Grundsätzlich werden schichtabtragende Verfahren (z.B. Beizen oder Brennen), schichtauftragende Verfahren (z.B. die galvanische und chemische Abscheidung von Metallen und Metalllegierungen) sowie schichtumwandelnde Verfahren (z.B. Anodisieren, Chromatieren, Phosphatieren) unterschieden.⁴⁶

Auch wenn der grundsätzliche Verfahrensablauf in der Galvanik immer sehr ähnlich ist, so zeigt sich die Realisierung einzelner Abläufe abhängig von den Produkthanforderungen und den verwendeten Stoffen sehr komplex und vielfältig. Die analysierten Projektberichte decken diese Vielfalt im Detail nicht ab und geben daher nur einen Ausschnitt möglicher Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz wider. Weitere grundlegende Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind in der Galvanik jedoch bekannt. Hierzu sei beispielsweise auf das Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen des Umweltbundesamtes verwiesen.⁴⁷ Dort werden insbesondere in Kapitel vier sehr umfangreich, verschiedene Ansatzpunkte beschrieben. Neben grundlegenden Maßnahmen werden im Merkblatt auch vermehrt Ersatzstoffe beziehungsweise Ersatzverfahren beispielsweise in Bezug auf die Verwendung von Chrom VI aufgeführt. Weiterhin sind für spezielle Prozesse und

⁴⁵ Seßler, Berthold (2012)

⁴⁶ Gaida, Bernhard (2013)

⁴⁷ Umweltbundesamt (2005)

verwendete Prozesslösungen, Techniken zur Rückgewinnung aufgeführt.

Die Herausforderung in der Galvanik besteht vor diesem Hintergrund vor allem darin, eine Gesamtoptimierung eines spezifischen Prozesses, d.h. insbesondere die gute Abstimmung der einzelnen Verfahrensschritte herbeizuführen. Einzelne/punktuellen Maßnahmen vermögen zwar an der einen Stelle eine Verbesserung der Ressourceneffizienz herbeiführen, können aber an anderer Stelle zur erhöhten Ressourcen-Inanspruchnahme führen. Die überwiegende Anzahl der Maßnahmen in den Projektberichten zur Galvanik stand daher auch im Kontext des Neubaus beziehungsweise der Neuausrichtung des jeweiligen Prozesses und damit einer systemischen Betrachtung und Verbesserung.

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Maßnahmen der Projektberichte zur Galvanik. Sofern eine Maßnahme auch unter den BVT aufgeführt war, wurde die Formulierung weitgehend aus den besten verfügbaren Techniken übernommen, da diese oftmals genauer dargestellt war und zumindest eine entsprechende qualitative Nutzenbeschreibung enthielt. Eine quantitative Einordnung war an dieser Stelle nicht möglich, da der erreichbare Nutzen – wie angemerkt – stark vom jeweiligen Prozess abhängt.

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung /Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Steuerung des Beschichtungsverfahrens in Echtzeit (Optimiertes Verfahren)	Erfassung von verfahrensrelevanten Daten durch digitale Steuerungssysteme in Echtzeit (bspw. Überwachung der Konzentration von Verfahrenskemikalien) [10] [1]	Zeitnahe Anpassung von Parametern um verfahrenstechnische Werte einzuhalten Verminderung von Emissionen Verbesserte Anlagenleistung und Produktqualität	Beschichten (Steuerung)	Emissionen Material Energie
	Einsatz von dichten Ölauffangwannen [1]	Vermeidung von Leckagen	Prozessperipherie	Emissionen
	Überprüfung und Optimierung der Chemikalienlagerung [1]	Vermeidung / Verminderung möglicher Gasbildung, des Brandrisikos, Korrosion durch korrosive Chemikalien und Verschmutzung durch bspw. Verschütten Vermeidung / Verminderung unvorhergesehener von Schadstoffabgabe	Prozessperipherie	Emissionen
Anpassung der Lagerbedingungen (Optimiertes Verfahren)	Integration der Oberflächenbehandlung in die Gesamtfertigung [1]	Ermöglichen einer umfassenden Prozesssteuerung Reduktion von Wasser- und Chemikalienverbrauch	Beschichten	Wasser Chemikalien
	Einhausung der Oberflächenbehandlung [1]	Vermeiden von Emissionen Reduktion des Energieverbrauchs	Beschichten	Emissionen Energie
	Lagerzeit zwischen zwei Arbeitsschritten verkürzen [1] Absaugung des Arbeitsplatzes sowie des Lagerbereichs [1]	Oxidation / Korrosion verhindern Kontakt mit Feuchtigkeit und saurer Abluft vermeiden Zusatzebehandlungen sowie evtl. Strippen und Nacharbeit vermeiden	Prozessperipherie	Material Energie Chemikalien Emissionen
	Einsatz von (recyclingfähigem) Verpackungsmaterial [1]	Beschädigungen durch Korrosion oder mechanische Beschädigungen vermeiden Evtl. notwendiges Strippen / Nacharbeit reduzieren	Prozessperipherie	Material (Chemikalien) Energie Emissionen

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Anpassung der Lagerbedingungen (Optimiertes Verfahren)	Beschichtung mit Öl oder Fetten [1]	Korrosionsschutz gewährleisten Vermeidung von Ausschuss und Nacharbeit allerdings mit höherem Chemikalien-, Energie- und Abwasser-verbrauch verbunden	Prozessperipherie	Material (Chemikalien) Energie Emissionen
Rückstände aus vorgelagerten Prozessen minimieren (Optimiertes Verfahren)	Einsatz der Minimalschmierung für die jeweilige Bearbeitung [1] Schmierfilme aus Kunststoff beim Stanzen [1] Bohren mit Pressluftkühlung [1] Vorreinigung der Werkstücke am Herstellungsort [1] Abtropfen/Schleudern der Werkstücke [1]	Anpassung an die tatsächlichen Erfordernisse des nachfolgenden Bearbeitungsschritts Minimierung / Optimierung von Rückständen aus vorgelagerten Prozessen Reduktion des Chemikalien- und Energieverbrauchs und der Abfallmenge	Nachbehandlung	Material (Chemikalien, Öle, Fette etc.) Energie Abfall
Optimierung der Gestellbehängung (Optimiertes Verfahren)	Anpassung der Gestellbehängung [1]	Sicherstellen der richtigen Stromverteilung Minimierung von Ausschleppung Sichern der Teile vor Herunterfallen und Verunreinigung der Prozesslösung Optimierung des Materialverbrauchs Reduktion der Materialverluste Reduktion des Wartungsaufwands für die Prozesslösung	Beschichten	Material

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Elektrolytbewegung (Optimiertes Verfahren)	Bewegung des Elektrolyten durch Druckluftdüsen, verdichtete Luft, hydraulische Bewegung oder Bewegung der Werkstücke (Warenträger / Warenschiene) [1]	Erreichung einer gleichmäßigen Konzentration Vermeidung von Gasblasen / Verunreinigungen an der Oberfläche, Unebenheiten etc., Reduktion von Ausschuss Optimierung des Chemikalieneinsatzes Bei der Bewegung des Elektrolyten ist darauf zu achten, dass eine erhöhte Verdunstung eintreten kann (Energieverluste)	Beschichten	Material (Chemikalien)
	Sicherstellung einer gleichbleibenden Phasenbelastung und Minimierung von Blindstromverlusten beim Transformieren [1]	Optimierung der Hochspannungsversorgung bei Großverbrauchern Senkung von Widerstandsverlusten Reduktion von Energieverlusten	Prozessperipherie	Energie
Reduktion des Energiebedarfs (Optimiertes Verfahren)	Reduktion des Spannungsabfalls in Leitungen / Verbindungen [1] Regelmäßige Wartung der Gleichrichter und Kontaktstellen (Warenschienen) [1] Installation moderner Gleichrichter (besserer Umrichtfaktor) [1] Erhöhung der Leitfähigkeit der Elektrolyte durch Additive / Leichtmetall-Kompounds [1] Modifikation der Wellenform (bspw. Puls / Polwechsel) [1]	Optimierung der Gleichstromversorgung Verbesserung der Metallabscheidung Senkung des Energiebedarfs	Prozessperipherie	Energie
	Einsatz energieeffizienter Komponenten (bspw. Motoren) [1]	Einsparung von Energie Senkung des Energiebedarfs	Prozessperipherie	Energie

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Reduktion des Wasserverbrauchs (Substitution / Wiederverwendung / Kaskadernutzung)	Einsatz einer Kreislaufanlage – Abtrennung prozessstörender Elemente (Mangan / Eisen) [3] Einsatz einer Nanofiltrationsmembran die im Niederdruckbereich betrieben wird (hohe Überströmung der Membrane – 1 Spülzyklus in 10h) [3] Nachschaltung eines Aktivkohlefilters [3] Ölhaltige Fraktionen werden zunächst über Abwasserreinigung gefahren und dann der Vorlage der Nanofiltration zugeführt [3]	Mehrfachnutzung der Spülwässer, Reduktion des Wasserverbrauchs um 28–32 % Entfernung von Tensiden und anderen organischen Verunreinigungen, Resultierendes Reinwasser entspricht Stadtwasserqualität	Spülen	Wasser
	Einsatz von Kühlsystemen mit geschlossenem Kreislauf [1]	Reduktion des Wasserverbrauchs	-	Wasser
	Mehrfachnutzung von Wasser aus Durchlaufkühlsystemen (Nutzung der Energie in der Spüle vor Trocknen, Nutzung im Prozess) [1]	Reduktion des Wasserverbrauchs	-	Wasser
	Substitution des Ionenaustauschers durch Spülkaskadierung [14]	Senkung des Spülwassermengen-Bedarfs	Spülen	Wasser

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Reduktion des Wasserverbrauchs (Substitution / Wiederverwendung / Kaskadennutzung)	Einsatz eines Koaleszenzabscheiders zur Abscheidung von Fremddülen und Feststoffen aus dem Entfettungsbad [2]	Trennung von Flüssigkeiten und Oberflächenölen / emulgierten Ölen	Spülen	Wasser
	Einsatz von Ultrafiltrationsanlagen (mithilfe von Membranen) [2]	Abtrennung von gelösten, dispergierten oder kolloidalen Substanzen in wässrigen Medien		
	Anordnung von Reinigungs- und Spülbädern in Kaskadenführung [2]	Mehrfachnutzung der Spülwässer		
	Einsatz der Elektroflotation als Trennverfahren [2]	Reinigung von Wasser mit flotierbaren Wasserinhaltsstoffen	Spülen	Wasser
	Nutzung von Regenwasser für ausgewählte Spülprozesse [13]	Reduktion des Wasserverbrauchs		
	Einsatz von Wasserspargeräten [13]	Einsparung von Frischwasser		
	Einsatz eines Ionenaustauschers – Leitung über Kationen und/oder Anionenaustauscherharze [1] [3]	Wasserverbrauch bedarfsgerecht steuern	-	Wasser
		Reduktion des Wasserverbrauchs		
	Einsatz einer Umkehrosmoseanlage [1] [15] [16]	Regeneration von Spülwasser	Spülen	Wasser
		Reduktion des Wasserverbrauchs		
		Regeneration von wässrigen Lösungen (bspw. Spülwasser)	Spülen	Wasser
		Reduktion des Energiebedarfs		
		Reduktion des Chemikalienverbrauchs		Wasser Energie Material (Chemikalien)

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Reduktion des Austrags (Optimiertes Verfahren)	Einsatz zueinander passender Chemikalien (z.B. Einsatz der gleichen Säure beim Beizen und der Folgebehandlung im sauren Elektrolyten) [1]	Reduktion der Folgen eines Austrags in nachfolgende Prozesse Reduktion von Chemikalienverlusten Reduktion des Wasserverbrauchs (Zwischenspülung)	Vorbehandlung Spülen	Material (Chemikalien) Wasser
	Optimierung der Positionierung, Dauer des Abtropfens sowie der Art des Aushebens von Werkstücken bei der Gestelbehandlung Positionierung: größte Fläche senkrecht, längere Seiten der Teile schräg/ waagerecht, untere Kante schräg stellen Ausheben: Schwenken der Gestelle beim Ausheben [1]	Erleichterung des Zusammenlaufens und der Tropfbildung der Prozessflüssigkeiten Reduktion des Austrags Reduktion von Chemikalienverlusten	Beschichten	Material (Chemikalien)

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Reduktion des Austrags (Optimiertes Verfahren)	Optimierung der Trommel sowie des Aushebens aus der Prozesslösung bei der Trommelbehandlung [1] Perforationen in der Trommelwandung mit genügend großen Querschnitt, um Kapillarkwirkung zu minimieren sowie hoher Perforationsanteil am gesamten Trommelkörper [1] Siebstrophen statt Bohrlöcher in der Trommelwandung [1] Drehen der Trommel mit Unterbrechungen beim Abtropfen [1] Neigen der Trommel beim Abtropfen [1] Anbringung von Drainageleisten im Trommelinneren [1] Ausblasen oder (Innen-)Spülung der Trommel [1]	Erleichterung und Optimierung des Zusammenlaufens und des Abtropfens der Prozessflüssigkeiten Reduktion des Austrags Reduktion von Chemikalienverlusten Verbesserter Lösungsaustausch im Prozess Verminderter Spannungsabfall	Beschichten	Material (Chemikalien) Energie
	Optimieren der Eigenschaften der Prozesslösung [1] Erhöhung der Temperatur der Prozesslösung [1] Herabsetzung der Konzentration der Prozesslösung [1] Zugabe von Tensiden [1]	Reduktion des Austrags Herabsetzung der Viskosität Herabsetzung der Oberflächenspannung Reduktion von Chemikalienverlusten	Beschichten	Material (Chemikalien)

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Substitution von Stoffen (Substitution)	Einsatz eines Chrom-III-Elektrolyten Vorfärben mit fluor-freiem Netzmittel (Anforderungen an Tenside sind außerhalb der Beize niedriger) [4]	Ersatz der Chrom-VI-Technik Benetzung / Aktivierung von Kunststoffbauteilen außerhalb der Beize Verzicht auf Chrom-VI und PFT-Netzmittel	Vorbehandlung	Material (Chemikalien)
	Realisation eines cyanidfreien, alkalischen Membran- verfahrens (Zink / Nickel-Trommel-Anlage) [7]	Verbesserung des elektrochemischen Wirkungsgrads Geringerer Energiebedarf (Reduktion um 50-60 %) Wirkungsgrad > 80 % (gegenüber 50-60 % bei konventionellen Verfahren) Reduktion der organischen Badzusätze (Reduktion um 50 %)	Beschichten	Material (Cyanid, Zink, Nickel, Organische Badzusätze) Energie Wasser
	Entwicklung zweier nickelbasierter Legierungen / Elektrolyte (Nickelphosphor und Nickelphosphorwol- fram) als Ersatz für Chrom-VI [9]	Herstellung einer chromfreien Verschleißschuttschicht für Tiefformen Entfallen des nachträglichen Temperierens der Druckformen (zum Verspannen der Verschleißschicht) entfällt Höherer Wirkungsgrad (Stromausbeute) zwischen 53-60 % gegenüber Chrombeschichtung Verzicht auf PFT-basierte Netzmittel und Chrom-VI- haltige Verbindungen Geringere Belastung von Abwasser und Abluft Reduktion des Energieverbrauchs	Beschichten	Material (Chemikalien) Wasser Energie

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Substitution von Stoffen (Substitution)	Einsatz des Heizzusatzes PRO-phx [8] Umrüstung / Anpassung des Pumpe-Filter-Systems [8]	Entfernung der störenden organischen und anorganischen Stoffe beim Beizprozess Ressourcenschonung: Reduktion von Frischsäure und weiteren Zusatzstoffen in den Beizbädern sowie von Behandlungschemikalien für die Abwasserbehandlung Abfallreduzierung: Reduktion des Altsäureaufkommens sowie von Abfall- und Abwasser	Beizen	Material (Chemikalien - Frisch- / Altsäure) Abwasser
	Einführung eines neuen Direktmetallisierungsverfahrens für Kunststoffe in eine bestehende Anlage [5] Verzicht auf chemischen Nickel-Schritt: Einsatz einer Chrom-VI-armen Beize Kunststoffoberfläche / ABS wird durch chemische Reaktion mit der Schwefelsäure / SO_3 verändert nicht zerstört [5] Sulfidbindungen lagern sich im Beschleunigerschritt an die eingesetzten Bismutkationen an [5] Zusätzlich wurde die Anlage (inkl. Anlagensteuerung, Erweiterung der Abwasserbehandlung, Prozessbäder etc.) so konzipiert, dass ein paralleles Abfahren von neuem und konventionellem Verfahren möglich ist [5]	Verchromung durch elektrolytische anstatt chemische Verfahren (gezieltes Verchromen) Erzeugung einer polaren Konversionsschicht Metallsulfidschicht erlaubt partielle Leitfähigkeit und die strominduzierte Nickelabscheidung Reduktion des Chemikalienverbrauchs (ca. 25 %) Heizenergieeinsparung von 50 % (Beiztemperatur liegt im neuen Verfahren 18 Grad niedriger) Abwasserreduktion 50 % (weniger Prozessstufen erfordern weniger Durchlauf- und Standspülen)	Vorbehandlung	Material (Chemikalien insbesondere Salpetersäure) Wasser Energie

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Standzeitverlängerung (Optimiertes Verfahren)	Zugabe von Wasserstoffperoxid in die Beize [3] Rückspülung mittels VE-Wasser [3]	Oxidation von Eisen-II-Ionen zu Eisen-III-Ionen zu oxidieren Anionische Chlorokomplexe (FE-III und Zn-Ionen) werden neben einem Teil von an Salzsäure vom Austauschharz aufgenommen. Regeneration des Harzes Standzeitverlängerung der Salzsäurebeize Metallionen und freie Säure werden eluiert – Eluat wird in der Abwasserbehandlungsanlage zu Metallhydroxid gefällt – Regenerat wird zur Ansäuerung der alkalischen Spülwässer genutzt	Badpflege	Material (Chemikalien) Wasser
	Elektrolyt wird über Austauschharz geleitet [3] Rückspülung mittels VE-Wasser [3]	Überschüssige Zinkionen werden durch Ionenaustauscherharz absorbiert Regeneration des Harzes Standzeitverlängerung der Zinkbäder	Badpflege	Material (Zink-Elektrolyte)
	Einsatz eines neuen kontinuierlichen Nickel-Mattverfahrens zur Herstellung von Mattchrom- oder Alulookoberflächen Filtertechnik (hintereinander geschaltete Kombination aus Plattenfilter und Kerzenfilter) [4]	Kontinuierliche Filtration der Stoffe im Teilstrom bei laufendem Betrieb (Online-Regeneration statt Batchverfahren) Standzeiterhöhung der Bäder Metallverluste reduzieren Energieaufwand reduzieren (kompletter Austausch von Bädern vermeiden)	Beschichten	Material (Nickelsulfat, Kalkmilch 20-% zur Nickelfällung) Wasser Galvanischschlamm
	Einsatz einer Öko-Spüle (Vortauchen), Luftmesser, Abquetschrollen [1]	Eintrag von Spülwasser in Prozesslösung verhindern Verlängerung der Standzeit der Prozesslösungen	Vorbehandlung	Material (Prozesslösung) Wasser

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung /Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Standzeitverlängerung (Optimiertes Verfahren)	Einsatz der Kühlkristallisation [1]	Abtrennung störender Salze aus der Prozesslösung Verlängerung der Standzeit der Prozesslösungen	Beschichteten	Material (Prozesslösung)
Verbesserung des Wirkungsgrades (Optimiertes Verfahren)	Errichtung einer alkalischen Zn/Ni-Membrananlage in Verbindung mit einem Verdampfer [7] Badflüssigkeit aus hochkonzentrierten, alkalischen cyanidfreien Zinklösung und Natriumhydroxid [7] Zusätzliche Ergänzung durch Nickelkomplex, Komplex- und Glanzbilder sowie Purifier [7] Abblasen der an den Teilen anhafteten Flüssigkeitsreste durch zwei Abblauhauben und einem Niederdrucklüfter, die in den Transportwannten integriert sind (RECYTEC-System) [7] Thermische Behandlung von Spülwasser mit einem Infrarot-Brenner [7] Einsatz einer Vierfach-Spül-Kaskade [7]	Komplexe Anionen aus dem Elektrolyt werden daran gehindert zur Anode zu gelangen Vermeidung von Cyanid- und Carbonatbildung Ökologisch und ökonomisch bessere Beschichtung von Kleinteilen Verbesserter elektrochemischer Wirkungsgrad (>80 %) Reduktion des Chemikalieneinsatzes im Bad Reduzierung des Chemikalien- und Spülwasser- verbrauchs und damit Abwasser- und Abfallaufkommen	Beschichteten	Material (Zink, Nickel, Chemikalien) Wasser
	Modifikation der Prozesse Aktivieren (Palladiumeinlagerung), Beschleunigen (Zinnentfernung), Chemisch Nickel (Metallisierung) durch unterschiedliche Größe des Palladium-Zinn-Kolloids und durch die Palladiumkonzentration [4] Einsatz von zwei Beschleunigern zum unterschiedlichen Abtrag von Zinn und Palladium (Steuerung über Konzentration, Temperatur, chemische Zusammensetzung) [4]	Mehr-Komponenten Kunststoffteile in einem Arbeitsgang selektiv beschichten Beschichtung in einem Arbeitsgang Reduktion von Materialeinsatz und manuellen Aufwänden der Montage	Beschichteten	Material

Tabelle 9: Maßnahmen im Prozess Galvanisieren und der Prozessperipherie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Verbesserung des Wirkungsgrades (Optimiertes Verfahren)	Echtzeitmessung im Bad mittels Messsonde zur Optimierung von Stromfluss und -dichte (Analytische online-Überwachung der Metall-Konzentrationen im Elektrolyt) Realisierung der Steuerungs- und Regelungselektronik und eines geeigneten Messsystems [10] [11]	Kontrolle der Stromdichteverteilung im Bad Vergleichmäßigung der Stromdichte im Galvanikbad Verbesserung des elektrochemischen Wirkungsgrades Vermeidung eines inhomogenen Materialauftrags Qualitätssicherung / Vermeidung von Nacharbeit	Beschichten	Material
	Regelmäßige Änderung der Polarität von Elektroden beim elektrolytischen Entfetten und Beizen [1]	Erhöhung des Wirkungsgrads Reduktion des Rohstoffverbrauchs	Vorbehandlung	Material
	Wiedergewinnung von Kupfer im Elektrolysekreislauf Realisierung eines Rückoxidaionskreislaufs [6]	Wiedergewinnung von Kupfer Verbrauchte Ätzlösung wird nach Entkupferung zusammen mit ammoniakhaltiger Abluft und Spülwasser zu neuer Ätzlösung aufgearbeitet Reduzierung des Materialeinsatzes Rückgewinnung von Chemikalien	Vorbehandlung	Material (Kupfer, Chemikalien)
Wiedergewinnung (Wiederverwendung)	Aufkonzentration von Spülwasser sowie verbrauchten Elektrolyten durch Verdampfer [1] [7]	Rückgewinnung / Wiederverwendung von Wasser und Elektrolyten Reduktion des Wasserverbrauchs und Materialeinsatzes	Nachbehandlung	Material (Elektrolyt) Wasser
	Einsatz der Elektrodialyse [1]	Aufkonzentration von verdünnten Lösungen Wasserentsalzung Reduktion des Wasserverbrauchs und Rückgewinnung von Austrag aus den Prozesslösungen	-	Material Wasser
	Einsatz der Refardation (Adsorption von Säuren durch Harze) [3]	Regeneration von Beizen Erhaltung des Aluminiumgehalts beim Anodisieren, Rückgewinnung von verbrauchten Säuren	-	Säuren

QUELLEN TABELLE 9

- [1] **Umweltbundesamt (UBA):** Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung – Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen. 2005. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_galvanik_vv.pdf
- [2] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** Energie- und Stoffstromanalyse bei der Beschichtung von Metallteilen (Endbericht). 2006. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1R9odMZ>
- [3] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Neuartige Aufbereitungsverfahren zur Standzeitverlängerung von sauren Zink-Bädern und Salzsäurebeizen sowie zur Prozesswasserkreislaufführung in der Galvanik (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1jmvLli>
- [4] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Einsatz Cr⁶⁺ freier Elektrolyte zur Verchromung von hochwertigen Automobil-Komponenten (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20094_BIA.pdf
- [5] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Implementierung eines neuen Kunststoffmetallisierungsverfahrens (Abschlussbericht). 2007. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/20_441_2_4_-_Implementierung_eines_neuen_Kunststoffmetallisierungsverfahrens.pdf

- [6] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Regenerierung von ammoniakalischer Ätzlösung (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussbericht_Anlage_zur_Regenerierung.pdf
- [7] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Ressourceneffiziente Zink/Nickel-Trommel-Galvanik-Anlage. EJOT GmbH & Co. KG (Abschlussbericht). 2010. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/ejot__abschlussbericht_endfassung_20101124.pdf
- [8] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):** Umrüstung einer Galvanik auf umweltfreundliche Beize (Abschlussbericht). 2006. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_zum_Begleit-_und_Messprogramm.pdf
- [9] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Innovative Schichtsysteme zur Substitution chromhaltiger Verschleißschutzschichten im Tiefdruckverfahren (Abschlussbericht). 2012. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1Lj818t>
- [10] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Stromdichtemessung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Galvanotechnik I (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1jw1UpP>
- [11] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Stromdichtemessung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Galvanotechnik II (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1RFojgc>
- [12] **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Teilstrombehandlung chromathaltiger Spülwasser (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/0330860A_-_Abschlussbericht.pdf

-
- [13] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Prozessorientierte Stoffstromanalyse in der Oberflächenveredlung bei der Thiele Metallveredlungs-GmbH (Projektkennblatt). 2004. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA_0304_RKB_Brenscheidt.html
- [14] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Prozessorientierte Stoffstromanalyse in der Oberflächenveredlung bei der HDO Druckguß- und Oberflächentechnik GmbH (Projektkennblatt). 2005. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA_0905_RKB_190_HDO.html
- [15] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Abwasser frei dank innovativer Umkehrosmose bei der SKF Sealing Solution/ Cobos Fluid Service GmbH (Projektinformationsblatt). 2009. Verfügbar unter: http://www.ressourceneffizienz.de/fileadmin/user_upload/unternehmen/pdf/EFA_COBOS_Loseblatt.pdf
- [16] **Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS):** Hoya Lens Deutschland GmbH (Projektinformationsblatt). 2008. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/index.html

3.6 Auswertung der Projektdokumentation zur Fertigungsverfahrenshauptgruppe Stoffeigenschaften ändern

Die DIN 8580 definiert die Verfahrenshauptgruppe Stoffeigenschaften ändern „als Fertigen durch Verändern der Eigenschaften des Werkstoffes, aus dem ein Werkstück besteht [...] durch Veränderungen im submikroskopischen bzw. atomaren Bereich, z. B. durch Diffusion von Atomen, Erzeugung und Bewegung von Versetzungen im Atomgitter, chemische Reaktionen. Unvermeidbar auftretende Formänderungen gehören nicht zum Wesen dieser Verfahren“.⁴⁸

Typische Verfahren dieser Verfahrenshauptgruppe sind wärmebehandelnde Verfahren wie Glühen, Härten und Vergüten sowie die Verfahren Magnetisieren und Bestrahlen von Eisen- und Nichteisenmetallen. Diese Verfahren sind mit einem erforderlichen Energieeintrag in das Werkstück/Halbzeug verbunden. Hinsichtlich der Ressource Material, insbesondere des Produktionsmaterials ist zu erwähnen, dass durch Verfahren wie dem Glühen, Härten, Vergüten und anderen Verfahren der Verfahrenshauptgruppe kein Abfallmaterial entsteht. Eine wichtige Rolle bei stoffeigenschaftsändernden Verfahren bildet die Ressource Energie. Die Ressource Energie kann bei diesen Verfahren als elektrische Energie oder Brennstoff zum Einsatz kommen. Die Energie wird dabei als Wärme zur Verfügung gestellt. Eine Reduktion des Energieeinsatzes kann beispielsweise durch eine Optimierung der Anlagentechnik (Einsatz effizienter Komponenten) oder einen gezielten Wärmeeintrag in das Werkstück/Halbzeug erreicht werden. Durch die Anwendung der Strategien „Kaskadennutzung“ und „optimiertes Verfahren“ kann die (Aus-)Nutzung der erforderlichen Wärmeenergie verbessert werden oder die erforderliche Prozesstemperatur gesenkt werden.

Bei der Bearbeitung von Messinglegierungen sollte beispielsweise nach jedem Bearbeitungsschritt eine Wärmebehandlung durchgeführt werden um das Material zu entspannen. Zu diesem Zweck wird das Messing in der Regel auf ca. 400° C erwärmt

⁴⁸ DIN 8580 (2003), S.5.

und anschließend langsam abgekühlt. Aufgrund der Materialeigenschaften von Messing bedarf es einen hohen Energieeinsatzes in Form von Wärme. Zur Reduzierung des Energiebedarfs bei der Bearbeitung von Messing bieten sich Maßnahmen zum gezielten Wärmeeintrag an (lokale begrenztes Einbringen von Wärmeenergie). Durch die Substitution des Werkstoffes selbst, kann ebenfalls ein positiver Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz geleistet werden.⁴⁹

Das Aushärten von Faserverbundwerkstoffen ist ebenfalls mit einem hohen Wärmebedarf verbunden. Zur Realisierung optimaler mechanischer Bauteileigenschaften werden die Bauteile bei Unterdruck und hohen Temperaturen in Autoklaven ausgehärtet. Potenziale zur Reduzierung des Energieeinsatzes bestehen in dem Einsatz alternativer Aufheiztechnologien oder dem Einsatz alternativer Matrixsysteme.⁵⁰

Die Auswertung der zugänglichen Projektdokumentationen hat folgende Maßnahmenkategorien im Bereich der Wärmebehandlung aufgezeigt:

- Nutzung der prozessbedingten Abwärme zum Vorwärmen von Gütern die wärmebehandelt werden
- Ausstattung der Prozesse mit Sensoren zur exakten Steuerung der Anlagentechnik
- Optimierung bestehender Verfahren durch Neubau von Anlagen bei gleichzeitiger Verbesserung des Anlagenkonzepts

Tabelle 10 gibt einen prägnanten Überblick über die Maßnahmen im Einzelnen.

⁴⁹ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)

⁵⁰ Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008)

Tabelle 10: Maßnahmen bei der Wärmebehandlung

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Nutzung von Abwärme (Kaskadennutzung, neue Anlage)	Entwicklung einer Aufwärm-/ Abkühlstation für Coils (geschlossener Raum in dem die Abwärme der heißen Coils auf die kalten Coils übergeht) [1]	Übertragung der in den geglühten Coils enthaltenen Wärmeenergie auf die kalten, noch zu glühenden Coils Energieeinsparung	Aufwärmen der Coils zum anschließenden Glühen (Prozessperipherie)	Energie (Wärme)
	Entwicklung eines temperaturstabilen Wärmebehandlungsofens [2]	Verbesserung der Prozessqualität Energieeinsparung	Brennen von Keramik (Prozessschritt)	Energie (Wärme)
	Errichtung eines gasbeheizten Blankglühofens in dem Messingbänder vertikal und unter Schutzgasatmosphäre geglüht werden [3]	Energieeinsparung Einsparung von Chemikalien	Wärmebehandeln von Messingbändern (Prozess)	Energie (Wärme)
Einbau von Messequipment (Optimiertes Verfahren (Reduzierung))	Ausstattung eines Hubherdofens mit einer automatischen Temperaturregelung [4]	Regelung der Stahlqualität in Abhängigkeit der Referenztemperatur Einsparung der Gasmenge durch bedarfsorientierte Regelung	Wärmebehandeln (Prozess)	Energie (Wärme)

QUELLEN TABELLE 10

- [1] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:** BEST-Projekt alutec Metallwaren GmbH & Co. KG. 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/BEST-Programm/Endbericht_Alutec.pdf

- [2] **Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung:** Innovativer Glühofen bei der Karl Buch Walzengießerei GmbH & Co. in Betrieb genommen (Projektkennblatt). 2004. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/suche/dokumente.php?action=search&lang=de&pfm=03&pfy=2000&ptm=02&pty=2015&words=+Walzengie%C3%9Ferei&filter_language=de#result

- [3] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Innovatives, ressourcen-effizientes Blankglühkonzept bei der Wärmebehandlung von Bändern aus Messing durch den Einsatz eines gasbeheizten HICON/H2-Vertikal-Blankglühofens (Abschlussbericht). 2013. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht_messingwerk_plettenberg_final.pdf

- [4] **Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung:** Temperaturregelung des Hubherdofens (Projektkennblatt). 2005. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/de/pius_info_pool/dokumentenpool/?type=40&page=22

3.7 Auswertung der Projektdokumentation zu verfahrenstechnischen Prozessen

Neben den Fertigungsverfahren nach DIN 8580 werden innerhalb der verfügbaren Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme auch Ressourceneffizienzmaßnahmen zu verfahrenstechnischen Prozessen beschrieben. Die Verfahrenstechnik beschreibt, laut Definition der VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC), die technische und wirtschaftliche Durchführung aller Stoffumwandlungs- und aufbereitungsprozesse, bei denen die Stoffe nach Art, Eigenschaft und Zusammensetzung verändert werden.⁵¹

Diese Prozesse basieren dabei auf folgenden mechanischen, thermischen, chemischen, elektrisch-magnetischen sowie biologischen Grundoperationen:⁵²

- mechanisch: z.B. Zerkleinern, Sedimentieren, Filtrieren, Zentrifugieren, Sortieren, Homogenisieren, Mischen, Kompaktieren etc.
- thermisch: z.B. Kondensieren, Verdampfen, Destillieren, Extrahieren, Sorbieren, Lösen etc.
- chemisch: z.B. Oxidieren, Fällung, Katalyse, Substitution, Addition etc.
- elektrisch-magnetisch: z.B. Elektrodialyse, Elektrophorese etc.
- biologisch: Biokatalyse, Biosynthese etc.

Zur Verfahrenstechnik gehören alle Techniken in denen aus einem Roh- oder Ausgangsmaterial, durch die Nutzung oben genannter Grundoperationen ein Produkt geschaffen wird. Unter der Herstellung eines Produktes kann sowohl die Gewinnung der Rohstoffe als auch die Herstellung von Zwischenprodukten und Endprodukten verstanden werden.⁵³

Zur Rohstoffgewinnung zählen z.B. die Gewinnung von Metallen aus Erzen (z.B. durch Röstreduktionsverfahren) oder

⁵¹ Blaß E. (1984)

⁵² Blesl M., Kessler A. (2013)

⁵³ Hirschberg H. G. (1999)

die Auftrennung der einzelnen Bestandteile des rohen Erdöls (z.B. durch Raffination). Aber auch die Wiedergewinnung und das Recycling von Wertstoffen aus Abfällen fallen unter den Begriff Rohstoffgewinnung.

Bei der Produktion von Zwischenprodukten handelt es sich meistens um chemisch sehr einfach aufgebaute Substanzen, welche als Ausgangsmaterial für die Herstellung komplizierter zusammengesetzter neuer Stoffe (Endprodukte) dienen. Zu den Zwischenprodukten zählen anorganische und organische Grundchemikalien wie z.B. Chlor, Schwefelsäure, Ethylen etc.

Endprodukte sind komplexe Stoffe, die an den Konsumenten gehen. Sie werden (per Definition) nicht weiter in der Wertschöpfungskette verarbeitet. Hierzu gehören zum Beispiel Arzneistoffe, Pestizide, Farben- und Lacke, Polymere für Fasertechnik (Textilien, Papier), Kraft- und Schmierstoffe für die Automobilindustrie, Plastik, technische Produkte usw.⁵⁴

3.7.1 Betrachtete verfahrenstechnische Prozesse

In dieser Studie werden folgende Anwendungsfelder, siehe Tabelle 11 innerhalb der Verfahrenstechnik näher betrachtet. Diese Anwendungsfelder/ Branchen sowie die betrachteten Ressourcen beziehen sich auf die Auswertung der verfügbaren Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme PIUS, UIP, BEST sowie der Datenbank Cleaner Production Germany und des Fördermoduls go-effizient der demea.

Eine Kategorisierung nach den Grundoperationen ist nicht vorgesehen, da diese Operationen in einem Verfahren oftmals aneinandergereiht werden und somit einen Gesamtprozess ergeben. So sind z.B. bei der Herstellung von Weißpigment verschiedene Operationen wie Filtern, Spalten oder Eindampfen in einem Prozess vorhanden.

⁵⁴ Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/produktionstechnik.html?referenceKeywordName=Fertigungstechnik>

Tabelle 11: Betrachtete verfahrenstechnische Prozesse kategorisiert nach Branchen und Anwendungsfeldern

Branche	Anwendungsfeld	Sparte	Betrachtete Ressourcen	Prozesse
Chemische Industrie	Herstellung Grundchemikalien	Anorganische Grundstoffe	(1) Chlor	(1) Chloralkalielektrolyse
		Herstellung organischer Grundchemikalien und Polymere	(1) Phenol, (2) Polyetheralkohol	(1) Phenolsynthese (Cumensynthese, Cumen-Oxidation, Phenolproduktion) (2) Adsorption, Thermolyse, Nassoxidation und Ozonung
	Fein- und Spezialchemikalien	Farbstoffe, Pigmente und Anstrichmittel	(1) Weißpigment, (2) Korrosionsschutzlack, (3) Druckfarbe, (4) Bauten-anstrichsysteme, (5) Klebstoff	(1) Titandioxid-Herstellung (2) Entwicklung eines VOC-freien Korrosionsschutzsystems (3) Herstellung Lösemitteelfreier Flexodruckfarbe (4) Dispergierung (5) Polymerisation in organischen Lösungsmitteln
	Raffinerien	Mineralöl und Gas: Petrochemikalien- und Derivate	(1) Steinkohlefeer, (2) Schmierstoffe (3) Dieselöl	(1) Katalytisches Reforming (2) Entwicklung neuer Basisöle (3) Entschwefelung
Zellstoff-/Papierherstellung	Papiermaschinen, Papierstreicherei	Bogen und Fasern	(1) Prozesswasser, Carbonatschlamm (2) Abwärme (3) Streichfarben	(1) Herstellung von Altpapier (2) Trockenpartie einer Papiermaschine, (3) Papierstreicherei
Eisen und Nichteisen-Metallindustrie	Erzeugung aus Primärrohstoffen	Erze und Konzentrate	(1) Blei, (2) Eisen,	(1) Bleiproduktion (2) Verhüttung, Aufbereitung Erz, Raffinerie
	Erzeugung aus Sekundärstoffen	Produktionsrücklaufmaterialien, Schrott	Metalle	Elektrochemische Entzinnung, Metallausschleusung, Konditionierung von legierungsmetallhaltigen Schlämmen
Textilherstellung	Herstellung von Garnen und Zwirnen aus verschiedenen Faserarten	Textilveredlung, Textilfärberei	Fasern, Wasser, Farbstoff, Energie	Vorbehandeln Bleichen, Waschen, Mercerisieren, Färben, Drucken und Ausrüsten

3.7.2 Ressourceneffizienzmaßnahmen bei verfahrenstechnischen Prozessen

Die Chemische Industrie ist ein wichtiger Faktor in der deutschen Wirtschaft. Stand 2011, sind laut Umweltbundesamt ca. 400.000 Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in der chemischen Branche beschäftigt⁵⁵. Doch obwohl die Umsatzzahlen in der chemischen Industrie derzeit sehr gut sind und das Innovationsniveau der chemischen Industrie in Deutschland bezogen auf Material- und Energieeffizienz sehr hoch ist, bestehen laut einer Studie des VDI-ZRE noch viele Einsparpotenziale bezogen auf Kernprozesse sowie die Prozessperipherie, vor allem in kleinen und mittleren Unternehmen.⁵⁶

Bezüglich einer Optimierung von Herstellungsprozessen in der deutschen Chemieindustrie, hat eine Studie des VDI Zentrums Ressourceneffizienz gezeigt, dass noch Einsparpotenziale, bezogen auf Material- und Energieeffizienz, vorhanden sind. Dabei können sich Ressourceneffizienzmaßnahmen in der chemischen Industrie zum Beispiel auf die Verbesserung von Herstellungsprozessen oder auf die Verbesserung der Produktgestaltung beziehen.

- In den Kernprozessen bestehen laut VDI ZRE noch Optimierungsmöglichkeiten bei der Wiederverwendung von Lösemitteln, dem Recycling, der Prozessintensivierung und in der Reinigung von Anlagen oder Bauteilen.
- Die Prozessperipherie könnte darüber hinaus in einigen Betrieben durch Verbesserungen der Wärmerückgewinnung, der Wärme- und Kälteversorgung, der Druckluftsysteme und der Elektromotoren effektiver gestaltet werden⁵⁷.

Auf der Produktebene gibt es zukünftig Optimierungspotenziale, wie zum Beispiel ein vermehrter Einsatz von nachhaltig angebauten, nachwachsenden Rohstoffen oder die Substitution von ressourcenintensiver und umweltgefährdender Stoffen mit ressourcenschonenderen Stoffen.

⁵⁵ Umweltbundesamt UBA (2014a)

⁵⁶ VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2014)

⁵⁷ vgl. ebenda

Bezogen auf die Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme liegt der Fokus der Auswertung bei den Ressourceneffizienzmaßnahmen in der chemischen Industrie auf folgenden Bereichen:

1. Herstellung von Grundchemikalien – Anorganische und organische Grundchemikalien
2. Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien
3. Raffinerien
4. Herstellung von Zellstoff- und Papier
5. Herstellung von Eisen und Nichteisen-Metall
6. Herstellung von Textilien

1. Herstellung Grundchemikalien – Anorganische und organische Grundchemikalien

Unter Grundchemikalien versteht man industriell hergestellte Chemikalien, die als Ausgangsmaterial für viele andere Industrieprodukte verwendet werden (siehe Definition Zwischenprodukte).

Folgende Chemikalien werden den Grundchemikalien zugeordnet

- Anorganische Grundchemikalien wie z.B. Chlor, Natronlauge, Schwefelsäure etc.
- Organische Grundchemikalien wie z.B. Ethylen, Propen, Benzol, Methanol etc.⁵⁸

Bezogen auf Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Grundchemikalien konnten aus den Förderberichten, u.a. Maßnahmen zur Optimierung bei der Chlorherstellung sowie bei der Herstellung von Polyetheralkohol und Phenol ausgewertet werden.

Chlorherstellung:

Deutschland ist einer der größten Chlorhersteller Europas, da Chlor eine der bedeutendsten Basischemikalien ist und bei

⁵⁸ Amecke H.B. (1987)

der Herstellung von etwa 70% aller Chemieprodukte benötigt wird. Der Herstellungsprozess von Chlor erfolgt durch die Chloralkali-Elektrolyse, einem elektrochemischen Prozess aus Salz, Wasser und elektrischem Strom. Gängige Elektrolyseverfahren sind derzeit das Membran-, das Diaphragma- und das Amalgamverfahren.

Die Chloralkali-Elektrolyse ist ein sehr energieintensiver Prozess. Das im Amalgamverfahren eingesetzte Quecksilber stellt eine große Umweltbelastung dar und das Diaphragmaverfahren ist sehr asbesthaltig.

Daher wird heutzutage fast ausschließlich das Membranverfahren in Chloranlagen angewendet.⁵⁹

Eine Verbesserung der Ressourcennutzung auf der Prozessebene kann hier durch ein neues Verfahren, der sogenannten Sauerstoffverzehrkathode (SVK) erfolgen. Im Gegensatz zu den klassischen Methoden der Chlor-Alkali-Elektrolyse finden bei der SVK-Technik andere Reaktionen an einer Kathode statt.

Hierbei wird Sauerstoff reduziert und kein Wasserstoff mehr gebildet. Dadurch sinkt das Potenzial der Elektrode stark ab und folglich verringert sich der Energieverbrauch gegenüber der Membrantechnologie.

Durch das neue Verfahren liegen die Einsparpotenziale für Deutschland bei ca. 10,5 Mio. MWh/a Primärenergie und das CO₂-Emissionsminderungspotenzial der Technologie liegt bei 2,6 Mio. t/a.⁶⁰

Herstellung Polyetheralkohol:

Polyetheralkohol wird zur Herstellung von Polyurethanen, insbesondere Polyurethan-Hartschäumen verwendet. Die Auswertung der Projektberichte, zeigt hier im Speziellen Maßnahmen zur Abwasservorbehandlung. Bei der Herstellung von Polyetheralkohol (PE) fallen nitroaromatenhaltige Prozessabwässer an, die üblicherweise durch Adsorption, Thermolyse, Nassoxidation und Ozonung vorbehandelt werden. Zur Reduzierung der CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)-Fracht werden die hochbelasteten

⁵⁹ Umweltbundesamt UBA (2013)

⁶⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung (2009b)

PE Prozessabwässer in diesem Vorhaben in drei getrennten Verfahrensstufen (siehe Tabelle 12) gemeinsam vorbehandelt.

Herstellung Phenol:

Phenol wird ebenso hauptsächlich als Ausgangsstoff zur Herstellung von Kunststoffen verwendet. Phenol wird auch zu Caprolactam umgesetzt, einem Stoff zur Herstellung von Polyamiden. Die Projektberichte zur Phenolsynthese zielen auf die Verwendung neuer beziehungsweise verbesserter Katalysatoren ab. Technische Katalysatoren spielen eine entscheidende Rolle in der chemischen Industrie. Der Einsatz von Katalysatoren macht einige Reaktionen erst möglich und trägt zur Einsparung von Ressourcen bei. Dabei werden Nebenprodukte und Abfälle aufgrund der katalytischen Selektivität und Spezifität vermieden⁶¹.

Für die Synthese des Zwischenproduktes Cumen kann durch den Einsatz eines verbesserten Katalysators der Anfall von verfahrensbedingtem Abwasser vermieden und durch eine erhöhte Produktausbeute eine Abfallreduktion erreicht werden (siehe Tabelle 12).

⁶¹ Umweltbundesamt UBA (2014b)

Tabelle 12: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung organischer Grundchemikalien

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
1) Herstellung von Grundchemikalien – Herstellung Chlor				
Optimiertes Verfahren	Einsatz einer Sauerstoff-Verzehr-Kathode : Bei dieser Art von Elektrode bringen die in porösen Strukturen elektrisch angebundenen Katalysatoren Gase in der Dreiphasengrenze flüssig-fest-gasförmig zur Reaktion [1]	– Senkung des Energieverbrauchs bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse – Minderung von CO₂-Emissionen	Prozess: Elektrolyse	Energie (Strom)
1) Herstellung von Grundchemikalien – Herstellung von Polyetheralkohol				
	Vorbehandlung der hochbelasteten Prozessabwässer in drei getrennten Verfahrensstufen: – Adsorption: in Kontakt bringen der Abwässer mit Überschussschlamm aus der Kläranlage – Belebtschlammanlage – Ozonisierung des vorgereinigten Abwassers [3]	Reduzierung der organischen Stoffe im Abwasser, Begrenzung des energintensiven Ozoneinsatzes der dritten Behandlungsstufe auf das notwendige Maß	Prozesskette: Adsorption, Thermolyse, Nassoxydation und Ozonung	Sonstige (CSB)

Tabelle 12: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung organischer Grundchemikalien (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
1) Herstellung von Grundchemikalien – Herstellung Phenol				
Optimiertes Verfahren	Optimierung der Phenolanlage: (1) Einsatz eines neuen Katalysators und Mehrfachnutzung von Kühlwasser (2) Veränderung des Verfahrens (3) Zuführung des Abwassers der biologischen Abwasserreinigung vor Ort (4) Oxidation organischer Stoffe im Abwasser (6) Zuführen der Abluft einer Waschkolonne, Entfernung des Acetons aus dem Abgas mit Wasser, Verwendung von vorhandenem Prozesswasser als Waschwasser, Gewinnung von Acetonkonzentrat aus acetonaltigem Prozesswasser und Aufarbeitung des Konzentrats zu reinem Aceton [2]	(1) Steigerung der Ausbeute an Cumen, Reduzierung der Rückführung nicht umgesetzter Rohstoffe, Einsparung von Elektroenergie und Heizdampf, Verringerung des Verbrauchs an Kühlwasser (2) Steigerung des Oxidationsgrades von Cumen und damit verbunden Senkung der rückzuführenden Cumenmenge (3) Reduzierung der Hydroperoxidkonzentration auf einen unkritischen Wert, Simultane Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs des Abwassers (CSB) (4.) Vermeidung von zusätzlichem Abwasser (5) Rückgewinnung des Acetons aus der Abluft	Prozess. Phenolsynthese – Cumensynthese – Cumen-Oxidation – Phenolproduktion: Abgaswäsche	Material (Cumen, Aceton, Hydroperoxid), Energie (Elektroenergie, Heizdampf), Sonstige (CSB), Abwasser

QUELLEN TABELLE 12

- [1] **Bundesministerium für Bildung und Forschung**
BMBF: CO₂-Reduktion durch den Einsatz von SVK-Elektroden für die Chlor-Alkali-Elektrolyse. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1GG5raB>

- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung**
BMBF: Produktionsintegrierter Umweltschutz bei der Phenolsynthese in der DOMO Caproleuna GmbH, Bonn. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Externe_Projektbeschreibungen/Phenolproduktion.pdf

- [3] **Umweltbundesamt UBA:** Abwasservorbehandlung durch Ozonung. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1GG5X8o>

2. Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien

In der Fein- und Spezialchemie werden Chemikalien produziert, die oft für sehr spezielle Anwendungen benötigt werden. Die Produkte werden, im Gegensatz zu Basischemikalien meistens in geringen Mengen und hoher Reinheit hergestellt. Zu den Fein- und Spezialchemikalien gehören u.a. Farbstoffe, Pigmente und Anstrichmittel⁶².

Typische Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien, bezogen auf die ausgewerteten Projektberichte, sind die (siehe Tabelle 13):

- Aufarbeitung von Rückständen aus der Pigmentproduktion
- Entwicklung von lösemittelfreien Druckfarben und Korrosionsschutzsystemen
- Einführung einer geschlossenen Produktionsanlage zur Dosierung und Dispergierung von Basen und Farbpasten

⁶² Neumüller O.A. (1983)

Tabelle 13: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
2) Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien – Herstellung von Titandioxid Weißpigment				
Optimiertes Verfahren, Wiederverwendung	Aufarbeitung der Rückstände aus der Titanoxid-Pigmentproduktion: Herstellung von titandioxidangereicherten Metalloxiden „Rutilit“ und Schwefeldioxid (1) Herstellung von Rutilit und Schwefeldioxid: Mischen der Aufschlussrückstände gemeinsam mit den beim Produktionsprozess anfallenden Filtersalzen aus der Dünnsäureaufbereitung und Spaltung in Wirbelöfen (2) Dünnsäure Voreindampfung [1]	(1) Herstellung von Schwefeldioxid zur Schwefelsäureherstellung (2) Nutzung der im Produktionsprozess anfallenden Abwärme zur Energieeinsparenden Voreindampfung (Vorkonzentrierung) der Dünnsäure → Energieeinsparung bei der Vordampfung, Senkung des Frischwasserbedarfs, Umweltentlastung durch Reduzierung der CO ₂ Emissionen	Prozess: Herstellung von Schwefeldioxid und Rutilit	Material (Titandioxid, Ilmenit, Schwefeldioxid), Energie, Frischwasser
2) Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien – Herstellung von Flexodruckfarbe				
Substitution/Wechsel	Lösemittelfreie Flexodruckfarbe Entwicklung von Farben auf Basis von Acrylat-dispersionen und Entwicklung geeigneter Druckplatten. Schrittweise Erhöhung der Feststoffanteile in wasserbasierten Druckfarben [2]	Vermeidung von organischen Lösemitteln (VOC Emissionen) → Halbierung des Lösemittelanteils von ca. 65 %	Produktdesign-/Entwicklung: Farbentwicklung	Material (Lösemittel)

Tabelle 13: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
2) Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien – Herstellung von Bauteinanstrichsystemen				
Optimiertes Verfahren, Substitution/Wechsel	Einsatz einer neuen Fertigungstechnologie Tinting-During-Filling (TDF) (1) Geschlossene Produktionsanlage (2) Modulare Rezeptstruktur (3) konsequente Rezeptentwicklung in Richtung emissionsfreier bzw. –armer Endprodukte (4) Dosierung direkt in das Verkaufsgebinde (TDF). Basen und Farbpasten werden in die Verkaufsverpackung dosiert und in dieser dispergiert [3]	Reduzierung von Emission und Abfallmengen → Reduzierung der Verlustmenge um ~3.400.000 Liter → Reduzierung des Energieverbrauchs um ca. 25,8kWh/t → Reduzierung des Spülwassers und gleichzeitig der VOC-Emissionen	Prozesskette: Dispergierung Produktdesign-/Entwicklung Rezeptentwicklung	Energie, Spülabwasser; Schmutzverdünnung, Material (Lackschlamm) Emissionen (VOC)
2) Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien – Herstellung von Korrosionsschutzlack				
Substitution / Wechsel	VOC-freies Korrosionsschutzsystem: Testen verschiedener chemischer Zusammensetzungen auf Basis von höhermolekularen Epoxidharzdispersionen und nukleophiler, wasserbasierender Härtungsmittel [4]	VOC-Reduzierung auf < 3,5 % Kundenvorteil: – Vorbehandlungsschritt der Chromatierung oder Phosphatierung entfällt → sehr gute Haftung auf dem Metall und gute Korrosionsschutzeigenschaften → erhebliche Materialeinsparung gegenüber herkömmlichen Systemen. → niedrige Trocknungstemperatur bei der Härtung reduziert gleichzeitig den Energieverbrauch.	Produktdesign-/Entwicklung: Entwicklung eines VOC-freies Korrosionsschutzsystems	Material (Lösemittel), Energie

Tabelle 13: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
2) Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien – Herstellung von Acrylat-Kleber				
Optimiertes Verfahren	Entwicklung des ACX-Verfahrens. (1) Die Polymerisation findet ebenfalls in Lösung statt, mit angepasster Masserezeptur und mit optimierter Lösungsmittelzusammensetzung (2) Zuführen des lösungsmittelhaltigen Basispolymers zum Aufkonzentrationsextruder (3) Lösungsmittelentzug über ein mehrstufiges Vakuumsystem (4) Wiedergewinnung des kondensierten Lösungsmittels. Dieses wird in einem geschlossenen Kreislauf und zum Polymerisationsschritt zurückgeführt. (5) Auslegung der benötigten Maschinen und Anlagen und Auftragswerke auf das lösungsmittelbefreite Klebstoffsystem [5]	Lösungsmittelfreies Mischen und Beschichten von Acrylat-Klebmassen. – Wegfall des bisherigen Lösungsmittelverfahrens – Entfall der nachgeschalteten Trocknung der Materialbahn → Einsatz organischer Lösemittel (~ 55 %) → Entsorgung organischer Lösungsmittel (~ 89 %) → Energieeinsatz (~ 50 %) → Emission von CO₂ (~ 35 %) → Prozesswasserbedarf (~ 100 %)	Prozesskette: (1) Polymerisation in organischen Lösungsmitteln (2) Abmischung (3) Beschichtung (4) Trocknung (5) Abgasreinigungs-anlage (6) Abwasserreinigung	Abwasser Material (organische Lösungsmittel) Energie

QUELLEN TABELLE 13

- [1] **Umweltbundesamt UBA (2003):** Aufarbeitung der Rückstände aus der Titanoxid-Pigmentproduktion. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/Aufbereitung_R%C3%BCckst%C3%A4nde_Titandioxid_Pigmentproduktion.pdf

- [2] **Deutsche Bundestiftung Umwelt DBU:** Weniger Lösemittel beim Flexodruck. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel25830_341.html

- [3] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2007):** BMU-Programm zur Förderung von Demonstrationsvorhaben. Vorhaben: „Einsatz einer neuen Fertigungstechnologie zur Herstellung von Bautenanstrichsystemen“. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/UBA_Abschlussbericht_AZ_50441-5_FINAL_gesamt.pdf

- [4] **Deutsche Bundestiftung Umwelt DBU:** VOC-freies Korrosionsschutzsystem. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel25827_341.html

- [5] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2012):** Produktionsanlage für doppelseitige Acrylatklebebänder mittels innovativer Technologie. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/tesa-abschlussbericht_endg_juni_2012.pdf

3. Raffinerien

Nach Angaben des Umweltbundesamtes, Stand 2013 sind in Deutschland 14 Raffinerien in Betrieb. Hauptprodukte von Raffinerien sind Rohbenzin, Otto- und Dieselmotortreibstoffe, Heizöle und Heizölkomponenten, wobei die Produktion von Dieselmotortreibstoff den größten Anteil mit fast 28% einnimmt. Nebenprodukte in Raffinerien sind Raffinerie- und Flüssiggas, Fluggasttriebwerke, Spezialbenzine, Bitumen u.a.

Die Herstellung von Benzin und Heizölen erfolgt durch die Auftrennung des Erdöls in Komponenten verschiedener Siedebereiche, dabei ist das grundlegende Prinzip der Auftrennung die fraktionierte Destillation. Bezogen auf die Herstellung bestehen bei der Raffination verschiedene Prozesse, darunter gehören u.a. die atmosphärische Destillation, Gastrennen, Katalytisches Spalten, hydrierende Entschwefelung, Blasbitumen-Herstellung, Gaswäsche, Schmierölraffination etc.

In der Raffinerieindustrie stellen Umweltauswirkungen eine Herausforderung dar, die es zu handeln gilt. Bei Feuerungsanlagen z.B. entstehen Emissionen an Schwefeldioxid sowie an Stickoxiden. Aus FCC-Anlagen gelangen Stäube in die Luft und im Tanklager z.B. fallen Emissionen an Kohlenwasserstoffen an. Neben den Emissionen in die Luft, fallen auch Emissionen in die Gewässer an. So entstehen z.B. direkte Kühlwässer bei der Gas- und Flüssigproduktkühlung nach thermischen Crackverfahren, welche Kohlenwasserstoffe, Phenole, Schwefelverbindungen und Thiosulfate enthalten.

Raffinerieabfälle gelten als weitere Umweltherausforderungen. Zu ihnen gehören Schlämme, verbrauchte Katalysatoren, Filterton und Asche aus der Verbrennung sowie Reaktionsprodukte aus der Rauchgasentschwefelung, Flugasche, anorganische Salze wie Ammoniumsulfat, Bitumen, verbrauchte Säuren und Laugen, Chemikalien etc.

Da in einem Raffineriekomplex sehr hohe Energie- und Stoffströme ablaufen und Rohstoffqualitäten und Anforderungen an die Raffinerieprodukte sich stetig ändern, beziehen sich Ressourceneffizienzmaßnahmen u.a. auf den sparsamen Umgang mit Ressourcen und somit auch auf den wirtschaftlichen Erfolg sowie

auf die Entwicklung umweltverträglicher Produkte und die Reduzierung von Schadstoffen in der Luft, im Wasser und im Boden.⁶³

Bezogen auf die Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme liegt der Fokus der Auswertung bei den Ressourceneffizienzmaßnahmen bei Raffinerien auf folgenden Bereichen bzw. Maßnahmen:

- effiziente Reinigung des Produktionsabwassers bei der Herstellung von Steinkohlenteer
- die Entwicklung und Produktgestaltung von Schmierstoffen
- Reduktion der Schwefelkonzentration bei Dieselöl

Steinkohlenteer

Steinkohlenteer ist ein Nebenprodukt der Koksgewinnung aus Steinkohle. Dieses wird aus den in der Kokerei anfallenden Gasen gewonnen. Steinkohlenteer besteht aus mehreren 1.000 meist aromatischen Verbindungen u. a. Kohlenwasserstoffen, stickstoffhaltigen Basen und Phenolen. Phenole die ins Abwasser gelangen haben eine schlechte biologische Abbaubarkeit und sind bekannt für ihre toxische und cancerogene Wirkung. Daher beziehen sich Maßnahmen bei der Steinkohlenteer Herstellung auf eine effiziente Reinigung des Produktionsabwassers um somit eine Reduktion von aromatischen Verbindungen zu erzielen (siehe Tabelle 14).

Schmierstoffe

Schmierstoffe in Kraftfahrzeugen (sowie in industriellen Maschinen) dienen vorrangig der Reduktion von Reibung und Verschleiß infolge von mechanischem Kontakt und Wärme.

Grundsätzlich werden Schmierstoffe wie folgt klassifiziert:

- Mineralöle: Destillationsprodukte bei der Raffination von Rohöl

⁶³ Umweltbundesamt UBA (2014c)

- Synthetische Öle: Produkte die physikalisch/chemisch weiterverarbeitet wurden⁶⁴

Maßnahmen bei der Entwicklung von Schmierstoffen liegen derzeit auf der Produktgestaltung und beziehen sich dabei auf folgende Bereiche:

- Entwicklung verdampfungs- und vernebelungsarmer Metallbearbeitungsöle
- Neue Basisöle aus nachwachsenden Rohstoffen
- Mineralölfreie Schmierstoffe auf Polymerbasis (siehe Tabelle 14)

Der Hintergrund für die Entwicklung von mineralölfreien, also synthetischen Schmierstoffen ist, neben dem Schwinden des Ausgangsstoffes Erdöl, die mitunter hohe Toxizität und Verweildauer von mineralölbasierten Stoffen.

Dieselöl

Dieselmotoren emittieren vor allem Stickoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2), die erheblich zur Luftverunreinigung beitragen. Zukünftig werden die Grenzwerte für die Schwefelkonzentration in Kraftstoffen weiter abgesenkt. Das Reduzieren der Schwefelkonzentration braucht aber heute noch viel Energie. Daher wurde ein Verfahren entwickelt, das Diesel ressourcenschonend von Schwefel befreit (siehe Tabelle 14).

⁶⁴ Eni (2015)

Tabelle 14: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei Raffinerien

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
3) Raffinerien – Herstellung von Steinkohleteer				
Optimiertes Verfahren	Neuerrichtete Sandfiltrationsanlage und Adsorberharzanlage (1) Sedimentation mit Neutralisation und Flockung (2) Sandfiltration und Flockung (3) Adsorption an polymeren Adsorberharzen mit Lösemittelregeneration [1]	Effiziente Reinigung des Produktionsabwassers Effiziente und weitgehende Reinigung des gesamten Produktionsabwassers (inkl. Niederschlagswasser) → Reduzierung der Toxizität und Verbesserung der biologischen Abbaubarkeit der Restbelastung des gereinigten Abwassers	Prozesskette: Katalytisches Reforming	Material (PAH, BTX (Benzol-Toluol-Xylol), Naphthalin) Abwasser
3) Raffinerien – Entwicklung von Schmierstoffen				
Substitution/Wechsel	Entwicklung verdampfungs- und vernebelungsarmer Metallbearbeitungsöle (1) Erproben neuer Basisöle insbesondere nachwachsende Rohstoffe, d.h. modifizierte pflanzliche Ester sowie Hydrocracksolvente und Mischungen von beiden [2]	Reduktion der Emissionen von organischen Schadstoffen in die Umwelt bis zu 90 %.	Produktdesign-/Entwicklung: Entwicklung neuer Basisöle	Material (Mineralöl, nachwachsende Rohstoffe)

Tabelle 14: Ressourceneffizienzmaßnahmen bei Raffinerien (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
3) Raffinerien – Entwicklung von Polymerschmierstoffen				
Substitution/Wechsel	Mineralölfreie Schmierstoffe auf Polymerbasis [3]	Für die Säuberung technischer Bauteile von den neuen Schmierstoffen ist Wasser als Reinigungsmedium ausreichend. Durch die Substitution der mineralölbasierten Schmierstoffe können erhebliche potentielle Umweltbelastungen vermieden werden.	Produktdesign-/Entwicklung: Entwicklung von Schmierstoffen	Material (Mineralöl)
3) Raffinerien – Entschwefelung von Dieselloil				
Optimiertes Verfahren (Reduzierung)	Tiefentschwefelung von Dieselloil durch Flüssig-Flüssig-Extraktion mit ionischen Flüssigkeiten: → Zugabe von Schwefel und spezialisierten flüssigen Salz in Dieselloil, wodurch zwei getrennte Phasen entstehen, eine schwefelhaltige und eine weniger schwefelhaltige. Phasen sind einfach voneinander zu trennen. Wiederholung bis zum gewünschten Grenzwert [4]	Energieeffiziente und umweltschonende Reduzierung der Schwefelkonzentration	Produktdesign-/Entwicklung: Entschwefelung von Dieselloil	Material (Dieselloil)

QUELLEN TABELLE 14

- [1] **Umweltbundesamt UBA:** Anlage zur adsorptiven Abwasserreinigung in der Grundstoffchemie. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1GG5PWq>

- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF:** Entwicklung und praktische Erprobung emissionsarmer Schmierstoffe unter Verwendung nachwachsender Rohstoffe. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1L9Cacs>

- [3] **Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF:** Mineralölfreier Schmierstoff auf Polymerbasis zur Kostensenkung und Ressourcenschonung in Prozessen der spanenden Fertigung und der Oberflächenbehandlung. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/01RI05054_-_Abschlussbericht.pdf

- [4] **Deutsche Bundestiftung Umwelt DBU:** Ionische Flüssigkeiten – Lösungen für die Zukunft. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel25828_341.html

4. Zellstoff- und Papierherstellung

Bei Papier handelt es sich im Wesentlichen um einen Bogen oder eine Bahn aus Fasern, die zur Verbesserung seiner Eigenschaften und Qualität mit Chemikalien versetzt wird.⁶⁵ Laut UBA, Stand 2014 bestehen in Deutschland ca. 200 Anlagen in der Papier- und Zellstoffbranche wovon sechs Anlagen den Zellstoffwerken zugeordnet werden.

Nach Angaben des Verbandes der deutschen Papierindustrie 2014 liegt die Papierproduktion bei 22,5 Mio. Tonnen.⁶⁶

Zur Herstellung von Zellstoff und Papier werden große Mengen an Wasser benötigt. Dabei fungiert das Wasser bei der Papierherstellung als Transportmittel für die Fasern, da die Wasserstoffbrücken zwischen den einzelnen Fasern verantwortlich für die Blattbildung sind.

Des Weiteren wird das Wasser in der Zellstoff- und Papierherstellung zur Erzeugung von Dampf, bei der Verarbeitung von Chemikalien und als Kühlmittel eingesetzt.

Ziele bei der Herstellung von Zellstoff und Papier sind, den Frischwasserverbrauch in der Produktion ständig weiter zu verringern sowie den Wassereinsatz und die Qualität des gereinigten Abwassers zu optimieren.

Somit können einerseits die Umwelt geschont und andererseits Ressourcen gespart werden. Bezüglich einer Optimierung des Wassereinsatzes in der Zellstoff- und Papierherstellung werden derzeit folgende Optimierungspotenziale genannt:

- Führen des Prozesswassers im Kreislauf (so lange wie möglich)
- Teilweise auch Verwendung von gereinigtem Prozessabwasser (vollständiges Recycling von Abwasser)

Neben der Optimierung des Wassereinsatzes sind bei der Herstellung von Zellstoff und Papier, bezogen auf die unterschiedlichsten Verfahren und Prozessstufen weitere Ressourceneffizienzmaßnahmen zu ergreifen. Hierunter gehören u.a. Maßnahmen zur

⁶⁵ Umweltbundesamt UBA (2014d)

⁶⁶ Verband Deutscher Papierfabriken VDP (2014)

- Reduzierung von Emissionen in das Abwasser und die Luft
- Reduzierung des Bedarfs an Energie⁶⁷

Besonders umweltrelevante Verfahren sind die Aufschlussverfahren (Sulfat- und Sulfiteverfahren) zur Herstellung von Zellstoff aus Rohstoff, der mechanische und chemisch-mechanische Aufschluss zur Gewinnung von Holzstoff sowie die Aufbereitung von Altpapier.

Bezogen auf die Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme liegt der Fokus der Auswertung bei den Ressourceneffizienzmaßnahmen bei der Zellstoff- und Papierindustrie auf folgenden Bereichen bzw. Maßnahmen (siehe Tabelle 15):

- Abwasservermeidung durch geschlossenen Produktionskreislauf
- Kreislaufwasserbehandlungsanlagen
- Errichtung von Energieversorgungsanlagen/Einbau von Wärmetauschern
- Rückgewinnung von Streichfarben in der Papierproduktion
- Optimierte Komponenten und Teilsysteme bei Papiermaschinen

⁶⁷ UPM (2015)

Tabelle 15: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Papierherstellung

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Wasserkreislaufschließung	Neues Verfahren zur Wasserkreislaufschließung : (1) Anaerobe Vergärung des belasteten Betriebswassers durch die neue Kreislaufwasserbehandlungsanlage (KWB-Anlage) in einem speziellen Turmreaktor und Entschwefelung des dort entstehenden Biogas (2) Aerobe Entkalkung des Wassers in zwei Belüftungsreaktoren [1]	(1) Deckung des Energiebedarfs der gesamten Anlage mit entstandenem Biogas (2) Zurückgewinnung des dort entstehenden Carbonatschlamm in die Produktion und Einbindung in das aus Altpapier hergestellte Papier.	Prozesskette/ Prozessperipherie: Herstellung Altpapier, Prozesswasser	Material (Carbonat), Abwasser, Energie
Wasserkreislaufschließung	Neues Lösungskonzept, das auf vorhandene Vorklärung einer Sedimentation aufsetzt (1) Enthärtung des Abwassers durch den High-Rate-Clarifier (HRC) (2) Kühlung des Abwassers mittels Plattenwärmetauscher und Zuführung zur biologischen Klärstufe (3) Membrane Operating System (MOS) zur Schlammtrennung (4) Eindüsen des Belebtschlamm-Luftgemisches mithilfe des MemJet-Verfahrens (5) Teilstrombehandlung mit Umkehrosmose (6) Gelangen des Abwassers zurück in das Frischwasserbecken über Zwischenbecken um Pumpstation [2]	Rückführung von 90 % des anfallenden Abwassers ohne Qualitätsverluste in die Produktion	Prozesskette/ Prozessperipherie: Papiermaschine (Langsiebmaschine, Wickelpapenmaschine), Prozesswasser	Abwasser

Tabelle 15: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Papierherstellung (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (=schritt)	Stellhebel
Wärmerückgewinnung	(1) Einbau eines Wärmetauschers in die Trockenpartie einer Papiermaschine (2) Einbau eines weiteren Wärmetauschers in die Abluft der Trockenpartie [3]	(1) Wiederverwendung der Abwärme aus der Trockenpartie (2) Ausnutzung der Restwärme zur Erzeugung des Warmwassers → Einsparung des Frischdampfesatzes	Prozessperipherie: Trockenpartie einer Papiermaschine	Energie (Wärme)
Streichfarbenrückgewinnung	Neue Anlagenkonzeption: Streichfarbenrückgewinnungssystem. (1) Erfassung der streichfarbenhaltigen Abwässer zentral in einer Sammelgrube unterhalb der Maschine und Pumpen der Abwässer in Pufferbehälter (2) 2- stufige Siebung (300µm und 100µm) der Abwässer (3) Abscheidung der Pigmente mittels Flockung in einem Sedimentationsbehälter und Eindickung der der Pigmente auf ca. 20 % TS (4) Zurückpumpen des Klarwasserüberstandes in den Prozess (5) Vermahlen der Pigmente in einer Kugelmühle auf den nötigen Feinheitegrad und Entwässerung in einem Dekanter auf ca. 50-55 % TS (6) Erstellung der fertigen Dispersion in Dispergiertank (Zugabe von Dispergiermittel, Natronlauge und Biozid) (7) Pumpen der Dispersion nach Bedarf in die Dispergiermaschinen und Durchlaufen einer 150 µm Kontrollsiebung [4]	Rückgewinnung der Streichfarbenpigmente aus Streichfarbenabwasser: – Rückgewinnung von 10 t/d an Pigmenten – 100 %ige Substitution von HCG durch das Verfahren – ca. 70 % weniger Energieverbrauch – Entfall des CO₂-Ausstoßes für bisherige Herstellung und Transport des Pigments – Reduzierung der Abwassermenge um 130.000 m³/a → Entfall der Entsorgung von 3500 t/a Pigmenten → Rückgewinnungsquote von 100 %	Prozesskette/ Prozessperipherie: Papierstreicherei	Material (Pigmente), Energie, Abwasser

Tabelle 15: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Papierherstellung (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schrift)	Stellhebel
Multiproduktionsanlage	Umstellung auf eine Multiproduktionsanlage (1) Neubau von zwei Stoffaufbereitungslinien (2) Einsatz der Teilstrommahlung in allen drei Stoffaufbereitungssträngen (3) Einsatz einer Vollstromflotation nach der Teilstromdispersionierung sowie eine Biowasserentfärbung im weißen Deckenstrang (4) Einsatz eines Drucksortierkonzeptes mit Rejektzirkulation (5) Verzicht auf ein drittes Sieb unter Einsatz eines Hybridformers und einem druckverlustarmen Verdünnungswasserstoffauflauf (6) Erhöhung des Feststoffgehaltes der Stärkeflotte durch den Einsatz einer großwalzigen Filmpresse (7) Verwendung von Stahlmantelzylindern in der Trockenpartie (8) Einsatz einer Dampfturbine mit erhöhtem Wirkungsgrad, um auf veränderte Stromkennzahl zu reagieren [5]	– Energieeinsparungen in Höhe von 75.070 MWh/a – Verringerung des CO₂-Ausstoßes um 19.155 t/a – Senkung der spezifischen Abwassermenge bei der Produktion von weißen Papiersorten um 2 m³/t	Prozess: Papiermaschine	Energie, Abwasser

QUELLEN TABELLE 15

- [1] **Deutsche Bundestiftung Umwelt DBU:** Abwasserfreie Papierfabrik. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/123artikel2060_341.html

- [2] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU:** Installation und Betrieb einer weitergehenden Abwasserreinigung mittels Membranbioreaktor (MBR) und Umkehrosmose (UO) und Rückführung des gereinigten Abwassers in die Produktion. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/110830_koehler-uba-abschlussbericht_2.pdf

- [3] **Effizienz-Agentur NRW:** Produktionsintegrierter Umweltschutz in der Papierindustrie bei der KANZAN Spezialpapiere GmbH. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA_0505_RKB_210_Kanzan.html

- [4] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU:** Streichfarbenrückgewinnung in der Papierproduktion. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/Kategoriebilder/Abschlussbericht_20125_Sappi.pdf

- [5] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU:** Umbau der Papiermaschine 4 zur Multiproduktanlage – Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/130726_abschlussbericht_rev_06_final.pdf

5. Herstellung und Bearbeitung von Textilien

In den Projektberichten werden Ressourceneffizienzmaßnahmen bezogen auf den Textilveredlungsprozess aufgezeigt.

Die Textilveredlung kann in unterschiedlichen Stufen der Fertigung erfolgen (Faser, Garn, Rohware oder Fertigprodukt). Bei den unterschiedlichen Bearbeitungsschritten der Textilveredlung werden Wasser, Chemikalien und Energie eingesetzt. Die Veredlung umfasst grundsätzlich die Hauptstufen Vorbehandeln (Entschlichten⁶⁸; Bleichen; Waschen; Mercerisieren⁶⁹); Färben; Drucken und Ausrüsten (einschließlich Kaschieren und Beschichten).

Die größte Herausforderung bei der Textilveredlung sind der hohe Wasserverbrauch und die Wasserverschmutzung. Weitere Probleme sind die abgasseitigen Emissionen und der hohe Energieverbrauch sowie der Einsatz umwelt- und gesundheitsgefährdender Chemikalien. Mit der Weiterentwicklung des Standes der Technik hat die Industrie in Deutschland schon erhebliche Verbesserungen erzielt. Weitere Verbesserungen sind durch produktionsintegrierte Maßnahmen möglich. Beispiele für produktionsintegrierte Maßnahmen, die im Rahmen der Projektberichte der verschiedenen Förderprogramme zur Verminderung von Umweltbelastungen geführt haben, sind (siehe Tabelle 16):

- Schlichterückgewinnung mittels Ultrafiltration
- Kreislaufführung von gereinigtem Prozesswasser
- Vermeidung von Abwasser durch das Färben von Nähgarnen aus Polyesterfasern in überkritischem Kohlendioxid
- Abwärmenutzung mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme.⁷⁰

⁶⁸ Definition Schlichte: Imprägnierflüssigkeit in der Textiltechni

⁶⁹ Mercerisieren: Veredlung von Baumwollerzeugnissen zur Erhöhung des Glanzes

⁷⁰ Umweltbundesamt (2014f)

Tabelle 16: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Textilherstellung/Textilverarbeitung

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Prozessoptimierung	Energie- und Stoffstromanalyse: (1) Verkürzung der Spülzeiten, Reduzierung der Durchflussmenge und Ausweichen auf andere Aggregate bei der Farbapparatgruppe (2) Rückführung von Kühlwasser aus mehreren Anlagen (3) Rückführung des Kühlwassers aus der Natronlauge (4) Überprüfung des Wirkungsgrades der maschinen-internen Wärmetauscher über Temperaturmessungen im Input- und Outputstrom der Wärmetauscher (5) Installation einer Abluftwärmerückgewinnung an den Spannräumen (Luft/Wasser-Wärmetauscher) (6) Reduzierung des Luft/Waren-Verhältnisses an den Spannräumen (7) Installation einer Wärmerückgewinnung für die Kesselhausabluf [1]	- Einsparung an Frischwasser von ca. 30.000 m³/a. - Senkung des Erdgasverbrauchs um ca. 6 %	Prozessperipherie: Textilveredlung	Abwasser, Energie (Wärme)

Tabelle 16: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Textilherstellung/Textilverarbeitung (Fortsetzung)

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Prozessoptimierung	Prozessoptimierung im Bereich: (1) Veredlung: Stoffliche Verwertung des Acrylanteils über ein Lösemittelverfahren (Stoffliches Recycling) z.B. Lösemittelverfahren (2) Färbeprozess: - Verlagerung der Avivierung, Instandsetzung einer vorhandenen Sprühtechnik, Verrohrung und Umbau - Optimierung des Energieeinsatzs bei der Färberei: - Anstelle des Einsatzes von Schweröl zur Dampferzeugung Einsatz einer Kombination aus Erdgasversorgung und solarer Prozesswärme für die Wärmeversorgung des Unternehmens [2]	- Vermeidung bzw. Reduzierung von Materialverlusten → Faserverluste, Textilabfälle, Wasserverluste, Farbstoffverluste - Energieeinsparungen	Prozesskette: Textilveredlung, Färbeprozess	Material (Fasern, Farbstoff) Wasser, Energie (Wärme)
Optimierte Wasseraufbereitung	Neues Wasseraufbereitungssystem bestehend aus Kombination von: (1) Mehrschicht- und Ultrafiltration mit einem Hohlfasermodule (50kD) (2) nachgeschalteten Umkehrosmosestufe mit einem Spiralwickелеlement [3]	- Reduzierung des Verbrauchs von Wasser und Abwasser im Prozess (chemikalienfreie Reinigung der Färbereiabwässer). - Einsparung von Wärmeenergie	Prozesskette, Prozessperipherie: Textilveredlung- Garnfärberei	Abwasser, Energie (Wärme)

QUELLEN TABELLE 16

- [1] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW:** Energie- und Stoffstromanalyse in der Textilveredlung. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozetcpgproject_projects%5Boffset%5D=50&tx_exozetcpgproject_projects%5Bsearch%5D=1&tx_exozetcpgproject_projects%5Bcat%5D=2406&tx_exozetcpgproject_projects%5Bid%5D=36127&cHash=c4d0a144de9cd49c7d4f7400c2999a06

- [2] **Deutsche Bundesstiftung Umwelt:** Prozesswasser-recycling in der Textilveredlung. Verfügbar unter: https://www.dbu.de/index.php?menuecms=123&objektid=27865&menuecms_optik=341

- [3] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich

6. Metallindustrie

Zur Herstellung und Verarbeitung von Metallen zählen die Eisen- und Stahl-Industrie und die Nichteisenmetallindustrie sowie die Weiterverarbeitung in Gießerei, Galvanik und Metallbearbeitung.

Die deutsche Metallindustrie ist der größte Stahl- und Nichteisenmetallerzeuger in der Europäischen Union. Zusätzlich erfüllt die Metallindustrie eine Schlüsselrolle innerhalb der deutschen Wirtschaft. Denn sie liefert die Haupteinsatzstoffe für den Fahrzeugbau, Maschinenbau, Elektrotechnik und Bausektor. Gerade auch für den zukünftigen Ausbau der erneuerbaren Energien und der Elektromobilität ist die Metallindustrie von entscheidender Bedeutung.

NE-Metalle haben eine hohe Bedeutung für hochtechnisierte Industrieländer. Sie finden Verwendung in der Elektronik- und Elektrotechnik, dem Maschinen- und Fahrzeugbau sowie im Bausektor.

Die Gewinnung-, Herstellung und Verarbeitung von Metallen ist sehr energie- und rohstoffintensiv und führt darüber hinaus zu starken negativen Umweltauswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.⁷¹

In dieser Studie wurden folgende Prozesse bezogen auf ihre Ressourceneffizienzmaßnahmen ausgewertet:

- Erzeugung von Metallen aus Primärrohstoffen
- Erzeugung von Metallen aus Sekundärrohstoffen

Erzeugung von Metallen aus Primärrohstoffen

Zu den Primärrohstoffen zählen Erze und Erzkonzentrate. In dieser Studie konnten Maßnahmen zur Bleierzeugung sowie zur Herstellung von Eisen und Stahl ausgewertet werden.

Erzeugung von Metallen aus Sekundärrohstoffen

Zu den Sekundärrohstoffen gehören nichteisenmetallhaltiger Schrott, Galvanikschlämme, Filterstäube und Produktionsrücklaufmaterialien.⁷²

⁷¹ Umweltbundesamt UBA (2014f)

⁷² Umweltbundesamt UBA (2014g)

Bei der Metallbearbeitung sowie der Oberflächentechnik resultieren aus den verschiedensten Produktionsprozessen Schlämme und Stäube mit teilweise hohen Gehalten an hochwertigen Metallen, wie z. B. Molybdän, Kobalt, Wolfram, Chrom, Nickel und Titan. Diese wurden bisher, mangels effektiver Recyclingmöglichkeiten teilweise als Stoffe mit Gefährdungspotenzial entsorgt.

Typische Maßnahmen bei der Primär- und Sekundärherstellung von Metallen sind u.a. (siehe Tabelle 17):

- Reduzierung der Abwassermenge und der Schadstofffracht bei der Bleierzeugung
- Konditionierung von Eisenhüttenschlacken
- Erhöhung der Recyclingrate von Reststoffen bei der Eisenherstellung
- Zurückgewinnung an wiederverwertbaren Metallen aus dem Schredderschrott
- Entzinnung von Stahlpaketen aus Weißblechschrotten
- Abtrennung der Wertmetalle von Katalysatoren

Tabelle 17: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Metallindustrie

Maßnahmekategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Optimierte Abwasseraufbereitung	Neugebaute Unkehrosioseanlage (1) Trennverfahren: Trennen der belasteten Abwässer in einen Teilstrom mit voll entsalztem Wasser, dem Permeat, und in einen zweiten Teilstrom mit Abwasserkonzentrat → Anwendung dieses Trennverfahrens lediglich auf Drainagewässer und auf die Abflutwässer aus Kühlkreisläufen (2) Entflechtung der einzelnen Abwasserströme vor der Unkehrosiose: Installation neuer Pumpstation und neue Rohrleitungen (3) Abwasserbehandlungsanlage: Fällung der Schadstoffe Arsen, Cadmium, Blei, Zink und Thallium in einem mehrstufigen chemisch-physikalische Prozess [1]	- Verminderung der einzuleitenden Abwassermenge und der Schadstofffracht → Senken der Abwassermenge um etwa 25 % → Reduzierung der Schadstofffrachten je nach Element um 5–80 % - Nutzung des Permeats innerbetrieblich u.a. zur Dampferzeugung	Prozesskette, Prozessperipherie: Bleierzeugung	Abwasser, Material (Permeat)
Konditionierung von Schlacken	Anlage zur faserfreien Zerstäubung von basischer Hochofenschlacke (1) Zerstäubung von hochviskosen Schmelzen unter der Voraussetzung einer deutlich erhöhten Zerstäubergas-temperatur [2]	Konditionierung Eisenhüttenschlacken zur Verwendung als Baustoff oder Düngemittel → Konditionierung der flüssigen Hochofenschlacke auf Basizitäten deutlich >12 möglich.	Prozesskette, Prozessperipherie: Eisenhüttenschlacken	Material (Schlacke)

Tabelle 17: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Metallindustrie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung/Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Konditionierung von Schlacken	Konditionierung von legierungsmetalhaltigen Schlacken und Stäuben (1) Entlüftungsvorahren: In den Schlacken und Stäuben enthaltene Stör- und Schadstoffe werden über ein umweltfreundliches Entlüftungsvorahren abgetrennt und können mindestens energetisch verwertet, in Einzelfällen auch an den metallverarbeitenden Betrieb (Abfallerzeuger) zurückgegeben werden (2) Behandlungs- und Kompaktierungsverfahren: Diese basieren ausschließlich auf physikalischen Prozessen, → die Metallfraktion wird nicht chemisch verändert (keine Oxidation) → keine zusätzlichen Umweltbeeinträchtigungen (Emissionen, Abwässer) bei der Kompaktierung [3]	Realisierung von materialspezifischer Rückführung der in Schleifschlämmen und Bearbeitungsstäuben enthaltenen hochwertigen Legierungsmetalle in den Kreislauf der Herstellung verschiedener Guss- und Stahllegierungen. → Ressourcenschonung: ca. 3500 t/a metalhaltiger (gefährlicher) Abfälle werden zu hochwertigen Einsatzstoffen für Gießereien und Stahlwerke aufgearbeitet → Abfallvermeidung: Im Gegenzug werden Sonderabfälle vermieden und somit Beseitigungskapazitäten geschont. → Im Vergleich zur Primärmetallgewinnung ist die Konditionierung wesentlich energieeffizienter. → Wirtschaftlichkeit: Effektivität der Rückgewinnungsprozesse wird durch die Qualität der Produkte erheblich gesteigert	Prozesskette, Prozesssperre: Konditionierung von legierungsmetalhaltigen Schlacken	Material (Molybdän, Nickel, Titan, Cobalt, Wolfram), Energie

Tabelle 17: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Metallindustrie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung /Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Recycling	Entwicklung einer Pilotanlage basierend auf: (1) Stichlochbohr- und Stopftechnik in Schachtofenanlagen (2) Entwicklung einer Einblasanlage zur Injektion der eisenhaltigen Feinstäube in den Schachtofenprozess [4]	- Erhöhung der Recyclingrate von Reststoffen der Eisen- und Hüttenindustrie in einem Schachtofenprozess - Verringerung der spezifischen Umweltbelastungen durch häufiges Tiefblasen - Verkürzung der Stillstandszeiten des aktiven Prozesses und der daraus resultierenden höheren Recyclingrate von Reststoffen	Prozesskette, Prozessperipherie: Stahlerzeugung	Material (Reststoffe Zink, Blei, alkalische Reststoffe)
Recycling	KompaktSORTIERanlage zur Metallausschleusung bei Schredderleichtfraktionen mithilfe von Sensortechnik (1) Zurückgewinnung der Metalle im Kornbereich ab 10mm während des Schredderprozesses gezielt mithilfe einer sensorgestützten Sortieranlage (2) Sensoren am Sortierband erkennen die einzelnen Bestandteile der Schredderleichtfraktion. (3) Ein Computer errechnet gleichzeitig die genaue Lage der einzelnen Materialien, die am Ende des Bandes mittels Druckluft gezielt aus dem Massenstrom heraus geschossen werden [5]	- Zurückgewinnung an wieder verwertbaren Metallen aus dem Schredderschrott (6 Gew.-% Metalle) - Erhalten einer nahezu metallfreien Schredderleichtfraktion (Restmetallgehalt in der Abfallfraktion < 1 Gew.-%) - Der Energieverbrauch für die Druckluftaufbereitung ist bis zu zwei Drittel geringer als bei den bislang auf dem Markt befindlichen automatischen Sortiersystemen.	Prozesskette, Prozessperipherie: Metallausschleusung bei Schredderleichtfraktionen	Material (Metalle), Energie

Tabelle 17: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Metallindustrie (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung / Nutzen	Prozess (-schritt)	Stellhebel
Recycling	Recycling von Nichtedelmetallkatalysatoren - (1) Abtrennung der organischen Bestandteile der verbrauchten Katalysatoren (2) Laugen der abgetrennten Bestandteile (3) Untersuchung der enthaltenen Werkstoffe in der Laugenlösung (4) Untersuchungen zur Laugung abgerösteter Katalysatoren mit verschiedenen Trägermaterialien im Druckaufschluss [6]	Stoffkreislaufschließung komplex zusammengesetzter, metallhaltiger Sekundärrohstoffe.	Prozesskette: Abtrennung der Wertmetalle von Katalysatoren, Laugung	Material (Nichtedelmetall-katalysatoren) ⁷³
Wieder-/ Weiterverwendung	Prozessorientierte Stoffstromanalyse im Bereich Elektrochemische Entzinnung (1) Neukonzeption Abscheideranlage für Niederschlags- und Regenwasser → „Dreistufige Abscheideranlage“ → Integration eines Ölskimmers → Einsatz eines Funkenspektrometers (2) Optimierung der elektrochemischen Entzinnung (Abfall) (3) PC-Analytik zur bedarfsorientierten Nutzung der Laugenbäder [7]	Entzinnung von Stahlpaketen aus Weißblechschrottten zur Weiterverarbeitung in Gießereien	Prozesskette: Elektrochemische Entzinnung	Material (Weißblech, Abfalllauge)

⁷³ Nichtedelmetallkatalysatoren die Nickel/ Kobalt/ Molybdän, Nickel/ Wolfram/ Molybdän bzw. Vanadium/ Molybdän enthalten

QUELLEN TABELLE 17

- [1] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB (2009):** Minimierter Wasserbedarf in der NE-Metallindustrie durch Einsatz der Umkehrosmose. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20137_Berzelius_Stolberg.pdf

- [2] **Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (2006):** Faserfreie Zerstäubung von basischer Hochofenschlacke. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/30855_-_Abschlussbericht.pdf

- [3] **Umweltbundesamt UBA (2009):** Konditionierung von legierungsmetallhaltigen Schlämmen und Stäuben. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/g_lang_abschlussbericht_projekt_1311_endfassung_08-2010.pdf

- [4] **Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF:** Schachtofenoptimierung für das Reststoffrecycling in der Stahlproduktion. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RW0123_-_Abschlussbericht.pdf

- [5] **Umweltbundesamt UBA:** Kompaktsortieranlage zur Metallausschleusung bei Schredderleichtfraktionen. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/20160_Abschlussbericht_LSH_Luebecker_Schrotthandel.pdf

- [6] **Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF:** Recycling von Nichtedelmetallkatalysatoren – Technische Versuche. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozetcpgproject_projects%5Boffset%5D=50&tx_exozetcpgproject_projects%5Bsearch%5D=1&tx_exozetcpgproject_projects%5Bcat%5D=2400&tx_exozetcpgproject_projects%5Bpage%5D=4&tx_exozetcpgproject_projects%5Bid%5D=36797&cHash=2659f618113f7a4651f1512c26ce9a2c
- [7] **Effizienz-Agentur NRW:** Prozessorientierte Stoffstromanalyse im Bereich Metallrecycling/ elektrochemische Entzinnung bei der Knippers Metall-Chemie O.H. Verfügbar unter: http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/proj_in_untern/EFA-0904_RKB_243_Knippers.html

3.8 Auswertung der Projektdokumentation zur Organisation

Neben den technischen Maßnahmen sowie Maßnahmen bezogen auf die Produktgestaltung, leisten auch die organisatorischen Maßnahmen einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz. Organisatorische Optimierungen können z.B. eine Reduzierung von Ausschüssen durch stärkere visuelle Kontrollen, eine bessere Ansteuerung von Maschinen, sowie eine Vereinheitlichung von Informationsflüssen ermöglichen. Organisatorische Maßnahmen betreffen eher die Organisation der Produktion und nicht die Fertigungstechnologie an sich.

Im Rahmen dieser Studie werden die organisatorischen Maßnahmen hier in folgende Kategorien eingeteilt: Arbeitsvorbereitung (Arbeitsplanung und Produktionssteuerung); Beschaffung und Logistik (Einkauf, Wareneingang, innerbetriebliche Materialversorgung, Lagerwesen und Transportvorgänge) sowie mitarbeiterbezogene Maßnahmen (Schulungen, Kommunikation, Personalplanung etc.).

Arbeitsvorbereitung (AV)

„Die Arbeitsvorbereitung umfasst alle Maßnahmen der methodischen Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung mit dem Ziel, ein Optimum aus Aufwand und Arbeitsergebnis zu erreichen“. Die Arbeitsvorbereitung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ressourceneinsparpotenzial eines KMU. Bisherige Anforderungen an die AV waren u.a. fokussiert auf kürzer werdende Durchlaufzeiten, steigende Qualitätsansprüche und hoher Variantenvielfalt bei jeweils niedrigen Kosten⁷⁴. Eine effiziente Arbeitsvorbereitung ermöglicht aber zusätzlich die aktuellen Anforderungen an eine ressourceneffiziente Planung.

So kann z.B. durch die Reduzierung nicht qualitätsentsprechender Produkte oder durch die Wahl alternativer Fertigungsverfahren eine Erhöhung der Materialeffizienz erfolgen. Handlungsmöglichkeiten im Bereich der Fertigung liegen sowohl bei den einzelnen Bearbeitungsprozessen als auch

⁷⁴ W. Eversheim (2002)

bei der Arbeitsplatzgestaltung, dem Werkzeug-Handling und besonders den Reinigungsprozessen.⁷⁵

Aber auch Dokumentationen und detaillierte Arbeitsanleitungen sowie eine geregelte Schichtübergabe haben einen großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz, somit lassen sich Fehler aufgrund unzureichender Informationen vermeiden. Arbeitsanleitungen sind häufig nicht schriftlich dokumentiert oder zu wenig detailliert (VDI 4800).⁷⁶

Beschaffung und Logistik

Einkauf/Beschaffung

Der Einkauf bietet zahlreiche Einsparpotenziale und hat somit einen großen Einfluss auf die Wertschöpfung des Unternehmens. Durch einen optimierten Beschaffungsprozess können erhebliche Ressourceneinsparpotenziale erfolgen. Zum Beispiel durch sinkende Materialkosten durch unternehmensweite Einkaufsrichtlinien, mehr Qualität und weniger Versorgungsrisiko durch optimale Lieferantenauswahl, spürbarer Zeitgewinn auf Grund effizienterer Zusammenarbeit mit Lieferanten oder auch durch Einsparungen bei Transaktions- und Prozesskosten sowie Ressourcen infolge automatisierter Beschaffung.⁷⁷

Innerbetriebliche Materialversorgung

Bei der innerbetrieblichen Materialversorgung bestehen häufig Probleme im Zusammenhang mit zu hohen Lagerbeständen. Diese Überbestände sind ein großes Problem für Unternehmen und die Umwelt. Neben der Senkung der Gewinnmargen im Unternehmen, werden aufgrund unnötig produzierter Artikel wertvolle Ressourcen wie Ausgangs- und Verpackungsmaterial, Energie und oftmals Wasser für die Herstellung sowie Kraftstoff für den Transport verschwendet.

Eine optimierte Materialversorgung und -zuführung kann durch eine erzielte, höhere Verfügbarkeit einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität bei der Wertschöpfung nehmen. Durch Methoden wie z.B. das Kanban System oder die Just in Time/Just

⁷⁵ M. Schmidt; M. Schneider (2010)

⁷⁶ VDI 4800

⁷⁷ <http://www.dv-treff.de/sap-wissen/optimierung-beschaffung-durch-sap-srm.aspx>

in Sequence Produktion können in der Regel die Bestände zu einem Großteil reduziert werden.⁷⁸

Lagerhaltung, Transportprozesse und Verpackungsmaterial

Eine optimale Lagerhaltung spielt eine wichtige Rolle für die Ressourceneffizienz. So können z.B. bei einer unsachgemäßen Lagerung oder bei einer Überlagerung, Materialverluste z.B. durch Witterungseinflüsse, Haltbarkeitsüberschreitung oder durch falsches Handling (Beschädigungen) entstehen, was oft zur Entsorgung von Materialbeständen direkt aus dem Lager führt.⁷⁹

Des Weiteren spielt auch das Behälter- und Verpackungsdesign eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Ressourceneffizienz. Lagerplatzverschwendungen oder das Blockieren von Fahrstraßen des Materialflusses durch sperrige Behälter und Verpackungen, das Umpacken von Material, um die Arbeitsplätze versorgen zu können, ist ein hoher unnötiger Arbeitsaufwand, der z.B. mit einem richtigen Behälterkonzept vermieden werden kann.

Einbeziehung der Mitarbeiter

Um Fehler in der Produktion zu minimieren und somit den Ausschuss und die Nacharbeit zu reduzieren, ist es wichtig, die Mitarbeiter in die Produktion einzubeziehen. Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz durch den Mitarbeiter sind zum einen ein umfassendes Verantwortungsgefühl in der Belegschaft für Qualität zu schaffen. Wichtig ist auch eine Null-Fehler-Planung und Maßnahmen wie Mitarbeiterschulungen und -trainings, konkrete Qualitätszielsetzungen, die konsequente Beseitigung von Fehlerursachen, die Sicherung geeigneter Kommunikationswege, die Nutzung des Wissens von Qualitätsexperten und die Anerkennung von Qualitätsleistungen. Vor allem das Einbeziehen der Motivation und der Fähigkeiten der Produktionsmitarbeiter in den Blickpunkt des Qualitätsmanagements stellt einen wichtigen Schritt zur Steigerung der Ressourceneffizienz dar. Folgende organisatorische Maßnahmen konnten bei der Auswertung im Rahmen des Fördermoduls go-effizient der Deutschen Materialeffizienzagentur demea ausgewertet werden (siehe Tabelle 18).

⁷⁸ <http://www.ifre.eu/optimierte-beschaffung.html>

⁷⁹ M. Schmidt; M. Schneider (2010)

Tabelle 18: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Organisation

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung
Einkaufsoptimierung	Optimierung des Wareneingangs: Kontroll- und Erfassungsverfahren und Retourenabwicklung mit Zulieferern	Einsparung der Einsatzmenge an Material; Vermeidung von zusätzlichen Kosten
	Stücklisten optimieren: Kontrolle und Vervollständigung der Abpack- und Stücklisten, Implementierung eines Änderungsdienstes	
	Optimierung des Warenausgangs: Festlegung von Prüfmethoden zur Warenausgangskontrolle einschl. Dokumentation	
	Einführung eines Softwaresystem zum Management des Materials	
	Qualitätsbezogene Einkaufskontrolle: Prüfen von Erstlieferungen, Serienlieferungen nur stichprobenhaft. Mangelhafte Teile werde zukünftig sofort zurück geschickt an Lieferanten	
Optimierung Lagerverwaltung / Lagerwesen und Logistik	Optimierung der Regalisierungstechnik: Umbau der Regale	Erhöhung der Transparenz, Bessere Lagerhaltung, Vermeidung von Materialbeschädigungen
	Kennzeichnung, Beschriftungen: Kennzeichnung aller Teile mit Artikelnummer, Lagerung von Material nur in dafür vorgesehene Lagerbereiche, in geeigneten Regalen, Bereinigung des aktuellen Lagerbestands	
	Erstellung neuer Lagerstruktur Festlegung eines Flächenkonzepts für den Bereich des Materiallagers	
	Schaffung klar dokumentierter und kommunizierter Prozesse und Lagerorte	

Tabelle 18: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Organisation (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung
Optimierung Lagerverwaltung/ Lagerwesen und Logistik	Erstellung neuer Lagerstruktur: Festlegung eines Flächenkonzepts für den Bereich des Materiallagers Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung : Einführung eines Kanban-Systems	Erhöhung der Transparenz, Bessere Lagerhaltung, Vermeidung von Materialbeschädigungen
	Verbesserung der Buchung der Lagermengen (Bestandstransparenz): Festlegung und Anpassung der Lagerverwaltungssoftware an die neuen Bedingungen insbesondere Erfassung der Restmaterialien. Aktive Nutzung der Restmengen (Verbesserung der erneuten Nutzung von Restmengen und Lagerware) durch das Verkaufsteam	
Arbeitsvorbereitung	Logistik intern optimieren – keine Zwischenlagerung an Maschine, Anlieferung nach Auftrag pro Maschine direkt vom Wareneingang, Sicherung von Behältern auf interner Transportpalette, Sicherung gegen Schlagstellen (bspw. Holzlaten), Geordnete Lagerhaltung → kein unnötiges Rangieren, Suchen	
	Standardisierung ERP-Stücklisten (GF Anlagenbau)	Reduktion der Liege und Wartezeiten,
	Standardisierung der Baugruppen und Komponenten in CAD und Stücklisten in der Hydraulik	Reduzierung der Umplanung von Fertigungsaufträgen,
	Standardisierung Modellreihen, Baugruppen, Optionen (GF Anlagenbau)	Senkung der Durchlaufzeiten → Materialeinsparung durch Fehlerreduzierung → Kostensenkung
	Arbeitsplätze umgestalten, wichtige Informationen vorhalten	
	Mehr Transparenz schaffen (z.B. zwischen den Bereichen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Produktion)	
	Montageanweisung: Verfahrensanweisungen für die Verarbeitung von neuen Werkstoffen	Sicherung der Produktqualität

Tabelle 18: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Organisation (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung
Verschnittoptimierung	Austausch von Zeichnungsunterlagen gewährleisten. Teilweise sind unterschiedliche Zeichnungen mit unterschiedlichen Maßen vorhanden	Vermeidung von Verschnitten und falscher Zuschnitte → Einsparung der Einsatzmenge an Material
	Überprüfung der Software hinsichtlich Potenziale zur automatischen Verschnittminimierung	
Transportprozesse optimieren	Ausarbeiten und markieren von festen Transportwegen in der Produktion	Reduzierung von Transportschäden, reibungsloser Transport von Produkten
	Verbesserung von Stellflächen und Transportmitteln für den Materialfluss	→ Einsparung der Einsatzmenge an Material
	Einsatz adäquater Transportmittel	
Einbeziehung der Mitarbeiter	Mitarbeiter im Umgang mit Material sensibilisieren und schulen	Minimierung von Fehlern in der Produktion, Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeit
	Erstellung von Schulungsplänen für Methodenschulungen (Ursache-Wirkungs-Analyse)	
	Arbeitsplatzgestaltung: Vereinfachung und Standardisierung der Büroabläufe	
	Kommunikation: z.B. Tägliche Managementinformationsliste per E-Mail versenden	
	Verbesserte Datenkommunikation: langfristige Planung neuer Produkte für Messen bis zur Serienreife, verbesserte Zusammenarbeit zwischen Vertrieb und Arbeitsvorbereitung, Arbeitsdaten auf den aktuellen Stand bringen	
	Einführung einer Methode zur Kontrolle einer nachhaltigen Umsetzung inkl. Umsetzung mind. 3 Maßnahmen pro Fertigungsbereich (Vermeidung von Wiederholungsfehlern)	
	Organisatorische Verbesserung im Prozessablauf: Geordnete Montageabläufe (GF Anlagenbau)	
	Neues Gleitzeitmodell	Erhöhung der Zeitflexibilität der Mitarbeiter, Erhöhung der Einsatzflexibilität

Tabelle 18: Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Organisation (Fortsetzung)

Maßnahmenkategorie	Maßnahmen	Zielsetzung
Qualitätssicherung		
Analyse von Stoffströmen	Festlegung von Prüfmethoden innerhalb des Fertigungsprozesses (Prüfintervalle, -merkmale, -dokumente) Stoffströme analysieren - Verluste / „Materialumlaufquote“ ermitteln	Senkung der Ausschussquote Einsparung der Einsatzmenge an Material, Vermeidung von zusätzlichen Kosten
Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	Einführung eines KVP-Prozess und eines Reklamationsmanagement (inkl. Kennzahlen): Erfassung aller interner und externer Fehler und regelmäßige Auswertung dieser (Fehlerursache und Fehlerzahl)	Aktive Ursachenbekämpfung von Fehlern (Senkung der Fehlerkosten bei gleichzeitiger Verbesserung des Betriebsergebnisses)

QUELLEN TABELLE 18

- [1] **Deutsche Materialeffizienzagentur:** Projektdokumentation aus Fördermodul go-effizient. Projektdokumentation ist nicht öffentlich zugänglich

4 VORSCHLAG ZUR VERBESSERUNG DER DATENGRUNDLAGE DURCH DIE PROJEKT-DOKUMENTATIONEN

Leistungsvergleiche anhand von Benchmarkwerten beziehungsweise Bestleistungen durchzuführen, sind auch zur Steigerung der Ressourceneffizienz ein wertvolles Instrument. Sie erlauben es den eigenen Einsatz an natürlichen Ressourcen einzuordnen und nach dem Vorbild des Vergleichspartners zu verbessern. Voraussetzung für einen derartigen Benchmarkprozess sind jedoch geeignete Vergleichspartner (bspw. hinsichtlich Produkt oder Produktionsprozess) und das Vorhandensein valider Bezugswerte.

Das ursprüngliche Ziel dieser Studie derartige Benchmarkwerte für verschiedene Produktionsprozesse differenziert abzuleiten, war auf Basis der Daten aus den vorliegenden Förderberichten nicht möglich. Auf vergleichbare Schwierigkeiten stießen auch Emec⁸⁰ und Zettl⁸¹ im Auftrag des VDI ZRE die spezifische Ressourceneinsparpotenziale in der metallverarbeitenden und chemischen Industrie untersucht haben. Für zukünftige Förderprojekte im Bereich Ressourceneffizienz soll daher an dieser Stelle ein Vorschlag für eine begleitende Projektdokumentation vorgestellt werden, die eine verbesserte Datenbasis liefern kann.

Um nachvollziehbar darzustellen, wie Projektdokumentationen verändert und ergänzt werden könnten, werden zunächst die festgestellten Schwachstellen der bisherigen Förderberichte und die möglichen Ursachen der fehlenden oder ungenügenden Datenbasis erläutert.

4.1 Bewertung bestehender Projektdokumentationen

Zunächst ist anzumerken, dass die untersuchten Berichte die jeweiligen Projektinhalte überwiegend sehr gut und auch nachvollziehbar wiedergeben. Fehlende oder lückenhafte, quantitative Daten zur Ressourceninanspruchnahme und zu Effizienzsteigerungen sind keine grundsätzlichen Defizite sondern häufig

⁸⁰ VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2013)

⁸¹ VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2014)

in der Projektanlage beziehungsweise in der Projektaufgabenstellung oder in den Anforderungen an das jeweilige Projekt begründet.

Eine große Zahl der Berichte dokumentiert beispielsweise Projekte mit starkem Forschungscharakter, bei denen die Markt- oder Serienreife der untersuchten Ressourcenthemen nicht unmittelbar im Mittelpunkt steht. Vielmehr geht es hierbei häufig um die Entwicklung und erste Erprobung grundsätzlicher technischer und organisatorischer Konzepte oder Instrumente für die Ressourceneffizienz. Grundlegende Daten sind hier zwar verfügbar, diese können jedoch nicht eins zu eins auf eine Serienfertigung übertragen werden.⁸² Bei Forschungsprojekten, die auch Demonstrationsanteile (im Labor- oder großtechnischen Maßstab) umfassen, sind zumindest weiterführende Potenzialabschätzungen vorhanden, die sich jedoch ebenfalls noch im laufenden Betrieb bewähren müssen. Referenzwerte zur Ressourceneffizienz können daher auf Basis von Forschungsprojekten nur bedingt abgeleitet werden.

Neben Forschungsprojekten existiert auch eine Vielzahl von Berichten zu Projekten, die Potenzialanalysen⁸³ für verarbeitende Unternehmen zum Inhalt hatten oder tatsächliche Implementierungen bzw. Umsetzungen begleiteten. Potenzialanalysen und Implementierungsprojekte stellen im Allgemeinen eine gute Quelle für quantitative Ressourceneffizienzdaten dar, da die Untersuchungen direkt im Praxisbetrieb und mit dem Ziel der wirtschaftlichen Nutzung durchgeführt werden. Die Datenverfügbarkeit hängt also zunächst mit der Projektart beziehungsweise mit dem Projektschwerpunkt (Forschung versus industrielle Umsetzung) zusammen.

Auch die Phase in der ein bestimmtes Projekt ansetzt, hat einen Einfluss auf die Verfügbarkeit quantitativer Daten. Viele der untersuchten Berichte beziehen sich auf Projekte, die zwar die Implementierung bzw. Umsetzung begleitet haben, an der nachfolgenden Evaluation jedoch keinen Anteil hatten

⁸² Eine Hochrechnung auf die Serienreife wäre an dieser Stelle – sofern geeignete Rahmenbedingungen definiert sind – denkbar.

⁸³ Mit Potenzialanalysen sind hier einzelne, relativ kurze Projekte gemeint, die Ist-Analysen durchführen und strukturiert Möglichkeiten zur Verbesserung der Ressourceneffizienz aufzeigen.

(unternehmensinterne Durchführung). Folglich waren auch in diesen Projektberichten entsprechende quantitative Daten nicht enthalten.

Ein weiterer Punkt betrifft die Projekthinhalte beziehungsweise die mit dem Fördergeber vereinbarten Projektziele. Diese reichen von der Entwicklung von Strategien, Konzepten, Instrumenten und Methoden für die Steigerung der Ressourceneffizienz bis hin zur Umsetzung spezifischer organisatorischer und/oder technischer Maßnahmen. Zuerst genannte Themen entziehen sich hierbei zunächst einer direkten Quantifizierung, sprich der Erfolg bestimmter unter dem Thema Ressourceneffizienz laufender Projekte lässt sich nicht unmittelbar durch entsprechende Daten belegen.

Der letzte Faktor betrifft die Datenerhebung selbst. Teilweise werden – mitunter aufgrund der oben angeführten Gründe – keine beziehungsweise keine strukturierten Anforderungen an die Projektdokumentation hinsichtlich der Erhebung quantifizierbarer Daten gestellt. Die Projekte sind daher oftmals sowohl in der Erhebung (Erfahrungswerte, Messungen, Stoffstromanalysen etc.) als auch in der Präsentation der erhobenen Daten frei (z.B. Darstellung des Gesamterfolgs auf Basis eines Bündels von Maßnahmen oder detaillierte Darstellung mit Maßnahmen bezogen auf einzelne Ressourcenströme) oder die verschiedenen Förderprogramme stellen schlicht unterschiedliche Anforderungen, was eine Vergleichbarkeit im Sinne eines Benchmarks erschwert. Die Vielfalt verfügbarer Daten ist daher sehr hoch.

Im Rahmen von Potenzialabschätzungen werden beispielsweise u.a. Angaben zu den Ist-Ressourcenverbräuchen, Ursachen für „Verschwendungen“, vorgeschlagene Maßnahmen und eine Darstellung des potentiellen Nutzens erwartet. Diese Daten weisen daher auch oft eine gewisse einheitliche Strukturierung auf. Die im Rahmen von Potenzialanalysen gelieferten quantitativen Daten stellen jedoch häufig zunächst nur Abschätzungen dar, die im Zuge einer Realisierung erreicht, unterschritten aber auch deutlich übertroffen werden können. Die Bewertung der ermittelten Potenziale erfolgt zudem nur in einzelnen Fällen auf vergleichbare Weise. Beispielsweise beinhalteten die Potenzialanalysen nicht zwingend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Einerseits wurden sehr umfassend theoretische Potenziale und andererseits lediglich unter ökonomischen Gesichtspunkten sinnvolle Potenziale ausgewiesen. Potenzialanalysen bieten daher zwar quantitative Daten, sind jedoch bisher meist stark an den spezifischen Projekt- und Unternehmenskontext gebunden.

Ähnliches lässt sich zu Berichten aus Implementierungsprojekten feststellen. Sie verfügen zwar idealerweise über Daten, die realisierte Ressourceneffizienzpotenziale und nutzenbezogene Ressourceninanspruchnahmen quantifizieren und auch entsprechende Maßnahmen beschreiben, eine standardisierte, strukturierte Erfassung der erzielten Erfolge hinsichtlich der Ressourceneffizienz ist jedoch auch hier nur selten gefordert. Daher liegen sehr unterschiedliche Bewertungen (monetär, mengenmäßig, absolute oder relative Angaben, Ressourcenverbräuche vs. Äquivalente wie bspw. CO₂-Emissionen) vor. Zudem ergaben sich auch Einschränkungen bei der Datenweitergabe und -veröffentlichung schlicht aus Geheimhaltungs- und Wettbewerbsgründen. Eine detaillierte Beschreibung der Rahmenbedingungen und Ausgangssituationen sowie der Maßnahmen blieb daher ebenfalls oftmals aus.

Bisher ist eine Ableitung von quantitativen Benchmarks auf Ebene von (Fertigungs-) Prozessen für die Ressourceneffizienz auf Basis der hier betrachteten Projektberichte daher nur begrenzt möglich.

Wie bereits angemerkt gibt es jedoch bereits erste Ansätze einer strukturierten Erhebung von quantitativen Daten hinsichtlich der Steigerung der Ressourceneffizienz. Vor allem bei geförderten Projekten, die einen Implementierungsschwerpunkt besitzen, finden sich entsprechende Anforderungen. Beispielsweise boten die Projektdokumentationen⁸⁴ der Potenzial- und Vertiefungsberatungen im Rahmen des vom BMWi beauftragten Fördermoduls go-effizient der demea detaillierte Daten zur Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs, der ergriffenen/geplanten Maßnahmen und erzielten Ressourceneinsparungen. Die Qualität dieser Berichte wird auch durch den Fördermittelgeber evaluiert. Die Projektberichte umfassen sowohl Potenzialanalysen als auch

⁸⁴ Derzeit sind die Projektdokumentationen der demea aus den Potenzial- und Vertiefungsberatungen nicht öffentlich zugänglich. Sie können nur auf Antrag eingesehen werden.

Umsetzungsprojekte. Projektschwerpunkte in den untersuchten Berichten waren jedoch Aktivitäten zur Einführung und Umsetzung von Technologien und Methoden, die bereits etabliert und auf dem Markt verfügbar sind. Wobei ein Großteil der Projekte auf organisatorische Maßnahmen zur Verbesserung zielte.

Die Projekte im Rahmen der PIUS-Finanzierung sowie in den Landesprogrammen zur Ressourceneffizienz in Baden-Württemberg haben einen ähnlichen Projektcharakter wie die Vorhaben im Fördermodul go-effizient der demea. Bei den Projekten handelt es sich um Vorhaben, die eine Verbesserung der Ressourceneffizienz durch die „beste verfügbare Technik“ erreichen. Der Forschungscharakter der Vorhaben ist gering ausgeprägt. Die öffentlich zugänglichen Projektdokumentationen zu den Programmen PIUS-Finanzierung, Betriebliches Energie- und Stoffstrommanagement (BEST) und umweltpolitischer Schwerpunkt (UPS) sind hinsichtlich der Quantifizierung der Ressourceneinsparungen und der Beschreibung der ergriffenen Maßnahmen weniger detailliert. Projekterfolge werden hier häufig auf Gesamtprojektebene und nicht bezogen auf einzelne Maßnahmen ausgewiesen. Darüber hinaus erfordert die Dokumentation im Programm BEST jedoch eine prägnante Beschreibung des gefertigten Produktes sowie der Hauptproduktionsprozesse die im Mittelpunkt der Ressourceneffizienzmaßnahmen stehen. Dies erlaubt eine Einordnung in den Verbesserungskontext.

Berichts-Kennblätter von Projekten mit einem deutlichen Forschungs- und Entwicklungscharakter (Demonstrationsvorhaben) beinhalten wie oben erläutert zwar einige quantitative Daten, Anwendungsgebiete und Rahmenbedingungen für die Übertragbarkeit beschriebener Maßnahmen sind jedoch nicht immer vermerkt und beschrieben. Enthaltene Quantifizierungen des Nutzens beziehen sich ebenfalls oftmals auf das Gesamtvorhaben und nicht auf einzelne Maßnahmen oder Ressourcenströme. Umfang und Tiefe des Projektberichts variieren zum Teil stark. Beispielsweise finden sich in der Dokumentation zu Förderprojekten im Umweltinnovationsprogramm (Umsetzungen von Forschungsergebnissen im großtechnischen Maßstab) eine sehr gute Beschreibung der Umsetzung inklusive der Darstellung der geplanten technischen Lösung sowie die

Erläuterung der erzielten Ergebnisse. Die Quantifizierung der erreichten Ressourceneinsparung bezieht sich jedoch auf das Gesamtvorhaben, so dass nicht eindeutig nachvollzogen werden kann, welche spezifische Maßnahme zu welcher Ressourceneinsparung geführt hat.

Ausgehend von der Darstellung der Ursachen fehlender/lückenhafter Daten und wahrgenommener Schwachstellen als auch Stärken bisheriger Berichte werden nachfolgend Anforderungen an die quantitative Datenerhebung im Rahmen von Ressourceneffizienzprojekten formuliert und ein möglicher Vorschlag für ein Berichtsdatenblatt dargestellt.

4.2 Anforderungen an die Projektdokumentation

Wie zuvor erwähnt werden Projektberichte bisher häufig nicht unter der konkreten Anforderung verfasst, quantitative Daten zur Verfügung zu stellen beziehungsweise für ein Benchmarking bereitzustehen. Sollen künftig Projektdokumentationen insbesondere von Projekten mit Demonstrationsanteil beziehungsweise Umsetzungsschwerpunkt stärker dazu beitragen, im Sinne eines Benchmarking zu unterstützen beziehungsweise Vergleichswerte abzuleiten, sollten bestimmte Daten zu Ressourceneffizienzprojekten strukturierter erhoben und um einige ergänzende Informationen erweitert werden.

Die im Folgenden beschriebenen Anforderungen haben nicht zum Ziel ein standardisiertes Projektdatenblatt für sämtliche im vorigen Abschnitt beschriebenen Projektkonstellationen zu entwerfen. Dies ist an dieser Stelle nicht möglich und könnte insbesondere spezifische, weitere Anforderungen verschiedener Förderprogramme nicht berücksichtigen. Sie dienen lediglich als Anregung für Fördergeber und Projektnehmer entsprechende Inhalte in ihre jeweiligen Berichte aufzunehmen.⁸⁵

Um ein Benchmarking für die Ressourceninanspruchnahme auf Prozessebene zu unterstützen und Unternehmen die Möglichkeit zu bieten, anhand ihrer eigenen Energie- und Ressourcensituation ihre spezifischen Einsparmöglichkeiten abschätzen zu

⁸⁵ Eine Zusammenfassung der folgenden, möglichen Teilbereiche für ein Berichtsblatt findet sich im Anhang I.

können, wird eine strukturierte Erfassung von Informationen und Daten in den folgenden Bereichen vorgeschlagen:

1. Allgemeine Informationen zum Unternehmen, in dem die Verbesserung der Ressourceneffizienz erfolgte sowie spezifische Eckdaten zum Projekt selbst
2. Detailliertere Informationen zu den durchgeführten Ressourceneffizienz-Maßnahmen mit Bezug zu Produkt/Prozess/funktionaler Einheit⁸⁶ (qualitative Beschreibung der Maßnahmen)
3. Daten zur erreichten Ressourceneffizienz mit Bezug zu Produkt/Prozess/funktionaler Einheit (quantitative Daten).

Die Erfassung dieser Daten kann dabei in getrennten Bereichen (Berichtsteilen) erfolgen, beispielsweise für den Fall, dass aufgrund der Projektanlage (bspw. lediglich Projektierung und anfängliche Begleitung einer Implementierung) bestimmte Teile wie die Quantifizierungen des Nutzens nicht dargestellt werden können.

Grundlegend werden dabei zwei Zielsetzungen angestrebt:

4. Zum einen soll es dem einzelnen Unternehmen, das sich für bestimmte Projekte interessiert, erleichtert werden, aus der Vielzahl der Berichte jene zu identifizieren, die in einem vergleichbaren Kontext und mit einem relevanten Themenschwerpunkt durchgeführt wurden. Zudem sollen detaillierte Ideen für Maßnahmen beschrieben und quantitative Daten als Richtwert für die erreichbare Ressourceneffizienz dargestellt werden.
5. Eine strukturierte und harmonisierte Erhebung der Daten würde es zudem erlauben, Berichts- und Projektdaten aus verschiedenen Programmen zu verdichten und beispielsweise im Sinne von prozessspezifischen Maßnahmenkatalogen (qualitativ) sowie Werten zur Ressourceneffizienz (quantitativ) besser auszuwerten.

⁸⁶ Funktionale Einheit: Basierend auf der Funktion/Nutzen eines definierten Systems bzw. Prozesses oder Produkts (bspw. Leistung eines gewissen Korrosionsschutzes) wird die funktionale Einheit abgeleitet. Bei einer Lackierung könnte die funktionale Einheit beispielsweise die „Lackmenge pro zu lackierender Fläche“ sein. Sie gibt die Hauptfunktion des Systems wider und anhand der funktionalen Einheit wird der Nutzen quantifiziert.

Hinsichtlich der ersten Zielsetzung lässt sich festhalten, dass ein Vergleich im Sinne eines Prozess-Benchmarkings für Unternehmen mit geringerem Aufwand verbunden und von unmittelbarem Nutzen ist, wenn das jeweilige Referenzobjekt/Projekt eine hohe Vergleichbarkeit beziehungsweise eine gute Übertragbarkeit zur eigenen Produktionssituation aufweist. Unternehmen streben meist in jenen Bereichen einen Vergleich an, in denen sie einen erhöhten Handlungsbedarf festgestellt haben. Hierbei werden in den ersten Schritten des Benchmarkings Prioritäten gesetzt, Schlüsselwerte festgelegt, die eine grundlegende Verbesserung widerspiegeln können und Untersuchungspunkte beziehungsweise Benchmark-Objekte konkret abgegrenzt. In Bezug auf ein Benchmarking auf Prozessebene in der Produktion können diese Objekte viele Bereiche wie Produktionsplanung, über periphere Prozesse und Fertigungsketten bis hin zu einzelnen Prozessschritten betreffen (siehe auch Abbildung 2 in Kapitel 2.2). Geht es Unternehmen daher nicht lediglich um die allgemeine Einholung von Impulsen und einzelnen Ideen, liegt bereits ein stärker eingegrenzter Fokus für vorgesehene Verbesserungen vor.

Um die Relevanz von Projektberichten in diesem Kontext besser einordnen zu können, müssten die unternehmensrelevanten Rahmenbedingungen und Einflussgrößen in den Berichten stärker herausgearbeitet werden. Weiterhin müssten bei einem Prozessbenchmarking hinsichtlich der Ressourceninanspruchnahme, insbesondere wenn es branchenintern geführt wird, beispielsweise auch die gleichen Qualitätskriterien an das zu fertigende Produkt angelegt werden.

Das Auffinden relevanter Benchmarks würde für Unternehmen daher erleichtert, wenn die Berichte sowohl das Projekt und die umsetzenden Unternehmen unter verschiedenen Aspekten stärker charakterisieren.

Betreffend Projekte mit Schwerpunkt Potenzialabschätzung und Implementierung wäre es zunächst hilfreich, folgende allgemeinen Daten zum Unternehmen zu erfassen.

**Tabelle 19: Anforderungen an die Projektdokumentation –
Allgemeine Unternehmensdaten**

Allgemeine Unternehmensdaten	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Name und Adresse des projektierten Unternehmens (Standort / Werk)	-
Branche	Wirtschaftszweige (WZL) oder NACE-Code
Unternehmensgröße	(Definition gemäß EU-Kommission (Hrsg.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG) <10 Mitarbeiter 10 <50 Mitarbeiter 50 <250 Mitarbeiter >250 Mitarbeiter
Unternehmensumsatz	(Definition gemäß EU-Kommission (Hrsg.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG) < 2 Mio. € 2 < 10 Mio. € 10 < 50 Mio. € >50 Mio. €
Produktportfolio (im Spektrum des projektierten Produktionsprozesses)	Nennung / Darstellung der Hauptprodukte
Prozessportfolio (im Spektrum des projektierten Produktionsprozesses)	Nennung wesentlicher Produktionsprozesse (zumindest auf Ebene von Hauptgruppen wie bspw. nach DIN 8580)

Diese Grunddaten – insbesondere die Erläuterungen zu Produkten und Prozessen – erlauben es eine erste Eingrenzung vorzunehmen und eine Übertragbarkeit von Ergebnissen einschätzen zu können. Wurde das Ressourceneffizienzprojekt in einem ähnlichen Produktionsumfeld durchgeführt, besteht die Möglichkeit, dass das projektierte Unternehmen grundsätzlich als Vergleichspartner in Frage kommen könnte.

Neben dieser grundlegenden Charakterisierung des Unternehmens sollte auch das Projekt selbst in Eckdaten strukturiert und zunächst grob beschrieben werden. Hierzu können folgende Daten dienen.

Tabelle 20: Anforderungen an die Projektdokumentation – Projektcharakterisierung

Projektcharakterisierung	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Projekttitel	-
Ausgangssituation	Kurzbeschreibung der Problemstellung und der (betrachteten) Verlustquellen (differenziert nach Ressourcen) ggf. inkl. Beschreibung des IST-Prozessablaufes
Zielsetzung	Qualitative Beschreibung der Zielsetzung des Vorhabens
Nutzenskizzierung	Qualitative Beschreibung des Nutzens insbesondere in welchen Phasen eine Ressourceneinsparung erzielt wird / wurde und ob damit eine (einmalige / kontinuierliche) Kostenveränderung verbunden ist (bspw. Senkung der Herstellungskosten, geringerer Energieverbrauch während der Nutzungsphase). Unter der Projektcharakterisierung sollte die Nutzenskizzierung auf Ebene des Gesamtprojekts erfolgen und auch die Beschreibung grundsätzlicher Anwendungsgebiete und der Übertragbarkeit beinhalten (bspw. im Falle von Beschichtungsentwicklungen, wo diese zum Einsatz kommen können).
Aufwand / Investitionen	Sofern Zahlen verfügbar sollte hier die nötigen Investitionen für das Gesamtprojekt ausgewiesen werden. Hierbei sollte vorrangig auf Sachmittel und entsprechende Dienstleistungen (bspw. Installation) abgestellt werden.
Verbesserungsbereich	Kurzbeschreibung in welchem Bereich die Ressourceneffizienzoptimierung ansetzt (bspw. Produktgestaltung, Fertigungsverfahren / Werkzeugentwicklung, Produktionsperipherie oder Organisation)
Art der Optimierung	Beschreibung der grundsätzlichen Strategien / Hebel, die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz untersucht / umgesetzt wurden (bspw. Wiederverwendung, Kaskadennutzung, Lebensdauerverlängerung).
Projektart	Hinweis, ob quantitative Daten verfügbar sind und in welchem Rahmen diese erhoben wurden. Eine mögliche Kategorisierung könnte anhand von Potenzialanalyse Implementierungsprojekt Forschungsprojekt ohne Umsetzung (bspw. Konzeptentwicklung, Machbarkeitsstudien, Methodenentwicklung etc.) Forschungsprojekt mit Umsetzung (Demonstration / Demonstrator) erfolgen.
Projektjahrgang	Angabe der Projektlaufzeit und insbesondere das Jahr des Projektabschlusses. Zur Beurteilung der Aktualität von Ergebnissen, Informationen und Daten.

Für interessierte Unternehmen sollen diese Informationen zum Projekt bei der Entscheidung unterstützen, ob ein bestimmtes Projekt aufgrund der inhaltlichen Themenstellung, der Projektart und der Aktualität für ein Unternehmen eine Relevanz für die eigenen Verbesserungsbemühungen besitzt. Insbesondere die Beschreibung der betrachteten Ressourcenverlustquellen, die Nennung des Verbesserungsbereichs und die Art der Optimierung wurden bisher in Berichtsblättern eher selten beschrieben, würden jedoch andererseits eine bessere Kategorisierung und Einordnung der Berichte erlauben.

Damit Unternehmen die Projektberichte dazu heranziehen können, operative Impulse im Sinne einzelner Maßnahmen zu erhalten und die Leistungslücke (erreichbarer Nutzen durch eine Maßnahme gegenüber IST-Zustand) quantifizieren können, sind jedoch tiefergehende Informationen und Daten notwendig.

Hinsichtlich der Dokumentation der Maßnahmen in einigen der untersuchten Projektberichte (bspw. in Berichten der demea oder PIUS) ließ sich feststellen, dass diese teilweise nur sehr grob charakterisiert werden (beispielsweise „Optimierung des Lackierprozesses“). Eine detaillierte Beschreibung wodurch konkret eine Verbesserung herbeigeführt wurde fehlt in vielen Fällen. Um für Unternehmen von Nutzen zu sein, sollten die Maßnahmen jedoch deutlich konkreter dargestellt werden (beispielsweise „Austausch der Ofenisolierung des Einbrennofens“, oder „Ersatz der dezentralen Kühlaggregate durch Anschluss an den vorhandenen Kühlwasserkreislauf“). Hierbei sollten auch Informationen zu den Ressourcen erfasst werden, die im Zuge der Einzelmaßnahmen beeinflusst werden sowie zum Produktionskontext in dem die Maßnahmen durchgeführt wurden.

Tabelle 21: Anforderungen an die Projektdokumentation – Beschreibung der Effizienzmaßnahme

Darstellung der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Bezug zu Produkt / Prozess / funktionaler Einheit	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Beschreibung und Auflistung der Einzelmaßnahmen im Projekt	Die Beschreibung der Maßnahmen sollte detailliert und prägnant erfolgen und die verbessernde Aktivität, das konkrete, betroffene Objekt sowie eine Verortung im betrachteten Prozess (Prozessschritt) umfassen.
Zielsetzung und Nutzen der Maßnahme	Idealerweise wird zusätzlich die Zielsetzung der einzelnen Maßnahme (auch im Zusammenspiel mit weiteren Maßnahmen) beschrieben. Falls möglich sollte darin auch der spezifische „Nutzen“ vermerkt werden (beispielsweise „Reduktion des Energieverbrauchs für die Druckluftherzeugung um 3 %“).
Status der Maßnahme (optional)	Wenn Maßnahmen im Projekt vorgesehen waren, jedoch im Laufe der Untersuchungen verworfen wurden, wäre es dennoch hilfreich diese unter Angabe der konkreten Gründe kurz zu dokumentieren (bspw. Amortisationsdauer liegt über 5 Jahre und wurde nicht akzeptiert).
Art der Optimierung	Ähnlich wie bei der Projektcharakterisierung sollte hier pro Maßnahme die grundsätzliche Strategie / Hebel, die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz umgesetzt / vorgeschlagen wurde, per Kategorie zugewiesen werden. Möglichkeiten hierfür sind: Substitution / Wechsel Wiederverwendung Optimiertes Verfahren (Reduzierung) Optimiertes Verfahren (Steigerung) Verwertung (stofflich, energetisch) Weiterverwendung / Kaskadennutzung

Tabelle 21: Anforderungen an die Projektdokumentation – Beschreibung der Effizienzmaßnahme (Fortsetzung)

Darstellung der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Bezug zu Produkt / Prozess / funktionaler Einheit	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Kategorisierung des Bereichs der Maßnahme	Ausgehend von einer ersten Verortung der Maßnahme (siehe oben), ist es sinnvoll, die Maßnahme nach ihrem Ansatzpunkt zu kategorisieren und den Kontext / Bereich näher zu beschreiben: 1. Handelt es sich um organisatorische Optimierungen wie z.B. Reduzierung von Ausschüssen durch stärkere visuelle Kontrollen, bessere / genauere Ansteuerung von Maschinen, Vereinheitlichung von Informationsflüssen. Also alle Maßnahmen die eher die Organisation der Produktion betreffen und nicht in die Fertigungstechnologie an sich eingreifen. 2. Maßnahmen, die bereits in der Produktentwicklung ergriffen werden und Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch in der Produktion haben. 3. Die Maßnahme setzt im Herstellungsprozess an, wobei zwischen dem Produktionsumfeld (wie zum Beispiel Heizung, Druckluftherzeugung, Kühlschmiermittelaufbereitung oder Beleuchtung) d.h. zwischen unterstützenden Prozessen und den primären Herstellungsprozessen unterschieden werden sollte. Setzt die Maßnahme im primären Herstellungsprozess an, sollte das zugeordnete Fertigungsverfahren (bspw. nach DIN 8580) genannt werden.
Nennung / Spezifizierung und Kategorisierung der betroffenen Ressourcen	Pro Maßnahme sollte zudem die Ressource benannt werden, die beeinflusst wird / werden soll. Weiterhin ist es für eine Verdichtung der Daten sinnvoll, die jeweilige Ressource zu kategorisieren beispielsweise anhand von: Natürliche Ressource (Luft, Wasser) Rohstoffe ((Produktions-) Material) Hilfsstoffe ((Produktions-) Material) Betriebsstoffe ((Produktions-) Material) Energie (Strom, Wärme, Kälte, Druckluft, Öl, Gas)
Aufwand / spezifische Investitionen	Um Unternehmen den Nutzen einer Maßnahme zu verdeutlichen, ist es notwendig einen ungefähren Richtwert hinsichtlich Aufwand / Kosten (Sachmittel, Dienstleistungskosten wie Installation) pro Maßnahme zu erfassen.

Werden oben genannte Informationen und Daten dokumentiert, sind die Maßnahmen nicht nur nachvollziehbarer sondern es bestünde auch die Möglichkeit spezifische Maßnahmenkataloge abzuleiten, die sowohl nach Prozessen als auch nach Ressourcenbereichen verdichtet werden könnten. Zudem ließe sich bestimmen unter welchen Strategien bisher Optimierungen durchgeführt wurden und mit welchen Amortisationszeiten ggf. zu rechnen ist. Letztere Information erscheint vor allem vor dem Hintergrund sinnvoll, dass derzeit viele Investitionen in die

Ressourceneffizienz aufgrund zu langer Amortisationszeiten zurückgestellt werden.

Die Maßnahmenbeschreibung und -kategorisierung erfordert bisher nur wenige quantitative Angaben. Wie bereits dargestellt, ist ein wesentliches Defizit in den Berichten, dass bisher keine ausreichende Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz erfolgt. Um den Erfolg einer Maßnahme zu quantifizieren und einen Beitrag zu Benchmarkwerten hinsichtlich der Ressourceneffizienz zu leisten, sind daher weitere Daten erforderlich. Wie unter Kapitel 1.2 erläutert ist die Ressourceneffizienz als Verhältnis von Nutzen (z.B. Funktion, Produkt) zu Aufwand (Einsatz von Ressourcen) definiert. Um einen seriösen Vergleich der Ressourceneffizienz und des Ressourceneinsatzes vorzunehmen, ist es daher notwendig sowohl den Nutzen als auch den Einsatz der Ressourcen zu quantifizieren. Für beide Größen (Zähler und Nenner) müssten daher Bezugsobjekte beziehungsweise Werte festgelegt werden. Bezüglich des Nutzens wird als Referenz üblicherweise das zu produzierende Produkt, die Dienstleistung oder die funktionale Einheit herangezogen. Diese sollen eine bestimmte Funktion erfüllen, die physikalisch im Sinne des Nutzens zu quantifizieren ist.⁸⁷ Diese Anforderung lässt sich in den beschriebenen Projektkonstellationen häufig nur teilweise erfüllen. Beschränkt sich ein Projekt beispielsweise auf die Betrachtung eines bestimmten Prozessabschnitts, wird der Output des Prozesses oftmals nicht in den Kontext des Produkts/der Dienstleistung gestellt und die Spezifikationen werden zwar implizit im Projekt beachtet, stehen jedoch für eine Veröffentlichung in Projektberichten überwiegend nicht zur Verfügung (bspw. Geheimhaltung). Hinzu kommt, dass einzelne Prozesse hinsichtlich verschiedener Produkte/Funktionen in der Regel mehrere Spezifikationen/Zielsetzungen erfüllen müssen. Eine präzise Abfrage dieser Daten wäre daher sehr umfangreich und die Daten würden für Berichtszwecke wohl nicht zur Verfügung gestellt werden. An dieser Stelle ist daher eine eher qualitative und indirekte Abfrage des Nutzens angebracht. Mithilfe der Informationen zu Produkt- und Prozessportfolio (siehe zuvor „Allgemeine Unternehmensdaten“) ließe sich so – wenn schon

⁸⁷ VDI 4800 Blatt 1, Kapitel 5

keine genaue Bestimmung möglich ist – zumindest eine Einschätzung über die Vergleichbarkeit des Nutzens herstellen.

Hinsichtlich der Bestimmung des Einsatzes von Ressourcen bestehen ähnliche Einschränkungen. Die Bestimmung der Inanspruchnahme der jeweiligen Ressource hinsichtlich eines bestimmten Nutzens erfordert die genaue Festlegung der betrachteten Systemgrenzen.⁸⁸ Projekte stecken mitunter sehr enge Systemgrenzen (bspw. einzelne Prozessabschnitte wie Lack-Applikation), die sich im Projektverlauf zudem ändern können (z.B. durch die Integration von Prozessschritten wie bei der Kombination von Spritz- und Trockenkabine). Die definierten Systemgrenzen werden wiederum häufig nicht in den Kontext des Produktsystems gesetzt. Eine Zurechnung der Ressourceninanspruchnahme zum jeweiligen Nutzen (Allokation) setzt weiterhin eine genaue Kenntnis der Ressourcenströme voraus, die häufig nicht Bestandteil der Projekte ist. Letztlich müsste die jeweilige Inanspruchnahme der Ressourcen anhand standardisierter Indikatoren und auch Verfahren erhoben werden, um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen. Bisher ist ein entsprechendes, umfassendes Indikatorensystem nicht verfügbar. Eine präzise Aussage im Sinne eines echten Benchmarks ist daher auf Projektbasis bisher nur in einzelnen Fällen zu erwarten, da diese Aufwände wie angemerkt nur selten beauftragt sind und entsprechende Voraussetzungen um beispielsweise eine genaue Allokation durchzuführen in Unternehmen bisher häufig nicht gegeben ist.

Statt einer präzisen Erhebung der quantitativen Daten, die in vielen Projektkonstellationen nicht erfüllt werden könnte, wird daher eine vereinfachte Bereitstellung von Daten zur Ressourceneffizienz in den Berichten vorgeschlagen. Diese ist im Sinne einer Mindestanforderung zu verstehen. Für die grobe Quantifizierung der Ressourceneffizienz und Ressourceninanspruchnahme wird die Erfassung folgender Daten vorgeschlagen.

⁸⁸ VDI 4800 Blatt 1, Kapitel 5.2

Tabelle 22: Anforderungen an die Projektdokumentation – Quantifizierung der erreichten Ressourceneffizienz

Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Benennung der Ressourcen (vor Maßnahme)	Nennung der Ressourcen, die durch eine Maßnahme beeinflusst wird. Hierbei sollte die betrachtete Ressource klar abgegrenzt/ definiert werden ⁸⁹ .
Beschreibung der Systemgrenzen	Nennung / Beschreibung des Prozesses / der wesentlichen Prozessschritte, die Gegenstand der Betrachtung sind.
Nutzenbeschreibung	Zumindest qualitative Beschreibung des (Zwischen-)Produkts und der wesentlichen Eigenschaften / Funktionen, die als Output aus den beschriebenen Systemgrenzen resultieren
Menge der Ressource (vor Maßnahme)	Angabe der Menge / des Verbrauchs pro Ressource in absoluten Zahlen (idealerweise werden daneben Angaben dazu gemacht wie die Messung der Verbräuche / Mengen durchgeführt wurde)
Kosten für die genannte Ressource (vor Maßnahme) (optional)	Sofern möglich sollten hier die Kosten pro Ressource angegeben und spezifiziert werden (bspw. Materialkosten, Entsorgungskosten). Die monetäre Bewertung ist gegenüber der Sachebene (Mengenangaben) jedoch nachrangig.
Maßnahmenzuordnung	Hier sollten Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenbündel vermerkt werden, die den jeweiligen Ressourcenverbrauch beeinflussen. Dies könnte weitgehend den Angaben entsprechen, die bereits unter der Maßnahmencharakterisierung gemacht wurden. Aufgrund des Zuordnungsproblems ist es jedoch sinnvoll, an dieser Stelle relevante Maßnahmen nochmals stichwortartig aufzulisten. Zudem soll hier aus Sicht der Ressource dokumentiert, welche Maßnahmen kumuliert zur Anwendung kamen.
Kategorisierung der Ressourcenwirkung	Eine Kategorisierung der Wirkung der ergriffenen Maßnahmen auf die jeweilige Ressource ist teilweise nötig, da in den Maßnahmenbeschreibungen nicht immer unmittelbar ersichtlich ist, wodurch ein geringere Ressourceninanspruchnahme erzielt wurde. Wird eine Ressource als Ergebnis beispielsweise in einem Prozess nicht mehr benötigt, sollte festgestellt werden ob die Ressource substituiert, anderweitig nutzbar gemacht etc. wurde. Mögliche Kategorien sind: teilweise Reduzierung vollständige Reduzierung Substitution Nutzbarmachung Steigerung (Mehrverbrauch) Steigerung der Ausbeute

⁸⁹ Hier kann wiederum auf die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 verwiesen werden, die entsprechende Definitionen für die einzelnen Ressourcen bereitstellt.

Tabelle 22: Anforderungen an die Projektdokumentation – Quantifizierung der erreichten Ressourceneffizienz (Fortsetzung)

Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Benennung der Ressource (nach Maßnahme)	Mitunter werden Ressourcen im Zuge der Maßnahmen substituiert, in anderer Form nutzbar gemacht oder es treten weitere Ressourcen hinzu etc. Daher soll an dieser Stelle die Ressource (wie oben) nochmals nach der Maßnahme benannt werden.
Beschreibung der Systemgrenzen (nach Maßnahme)	Für den Fall, dass sich betrachtete Systemgrenzen innerhalb des Projektes verschoben haben oder Ressourcen das ursprüngliche Betrachtungssystem verlassen
Nutzenbeschreibung	Hier sollte kurz beschrieben werden, ob der ursprüngliche, definierte Nutzen durch die ergriffenen Maßnahmen verändert wurde. Wiederum ist hier zumindest eine qualitative Beschreibung des (Zwischen-)Produkts und der wesentlichen Eigenschaften/Funktionen, die als Output aus den beschriebenen Systemgrenzen resultieren hilfreich.
Menge der Ressource (nach Maßnahme)	Wie oben – allerdings sind hier die Mengen nach Maßnahmendurchführung erforderlich (wiederum sollten hier Angaben über die Erhebungsmethoden gemacht werden). Zudem sollte hier darauf hingewiesen werden, ob es sich um einmalige „Einsparungen“ handelt oder um „Einsparungen“, die dem Unternehmen dauerhaft erhalten bleiben.
Kosten für die genannte Ressource (nach Maßnahme) (optional)	Neben der Darstellung der Kosten nach Maßnahmendurchführung (vergleichbar wie oben), sollte an dieser Stelle ebenfalls darauf hingewiesen werden, ob es sich um einmalige Einsparungen handelt oder um dauerhafte Kosteneinsparungen.
Höhe der Effizienzsteigerung pro Ressource (Menge in %) (optional)	Sollten absolute Angaben beispielsweise aus betrieblichen Gründen nicht möglich sein, so könnten hier zumindest relative Veränderungen vermerkt werden.
Höhe der Effizienzsteigerung pro Ressource (monetär in %) (optional)	Wie oben – sollten absolute Angaben beispielsweise aus betrieblichen Gründen nicht möglich sein, so könnten hier zumindest relative Veränderungen vermerkt werden.
Auswirkungen von Maßnahmen auf andere Prozesszielgrößen (Prozessstabilität)	Im Falle von punktuellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen sollten an dieser Stelle kurz die (möglichen) Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Prozesse beschrieben werden. Insbesondere sollten Einflüsse auf Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen den Prozessen dargestellt werden, die das Gesamtergebnis bzw. die gesamte Leistungsfähigkeit eines Prozesses beeinflussen wie z.B.: Auswirkung einer umgesetzten Maßnahme auf die gesamte Produktivität einer Anlage, auf die Ausbeute und die Qualität des Endproduktes
Auswirkungen von Maßnahmen auf andere Ressourcenströme	Nennung von zusätzlichen positiven/ negativen ökologischen Auswirkungen der getätigten Effizienzmaßnahmen die nicht Teil der Zielsetzung waren: Wie werden andere Faktoren (Ressourcenströme) beeinflusst? Verschlechterung anderer Faktoren wie z.B. eine Steigerung von CO ₂ Emissionen, eine Erhöhung von Schadstoffen in die Umwelt etc.

Wie erläutert lässt sich auch auf Basis der beschriebenen Daten kein präziser, spezifischer Benchmark für die Ressourceninanspruchnahme ableiten. Dieser Anspruch ist hinsichtlich der verschiedenen Projektformen im Themenfeld Ressourceneffizienz auch nicht zwingend notwendig. Würden die formulierten, grundsätzlichen Anforderungen jedoch in bestehende Berichte Eingang finden, könnte ein Benchmarking dennoch deutlich besser unterstützt werden. Zum einen können Vergleichspartner und relevante Projekte besser identifiziert, ähnliche Maßnahmen verdichtet und grundsätzliche Größen für die Ressourceneffizienz ausgewiesen werden. Damit könnte langfristig eine belastbare und hilfreiche Datenbasis geschaffen werden, die Unternehmen konkrete Maßnahmen und Ressourceneffizienzpotenziale aufzeigt.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz haben das Potenzial, steigenden Preisen für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe entgegenzuwirken, hohe Materialkosten im verarbeitenden Gewerbe positiv zu beeinflussen und einen Beitrag zur Schonung unserer natürlichen Umwelt zu leisten.

Verschiedene Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene unterstützen seit langem Projektvorhaben, die auf einen effizienteren Umgang mit natürlichen Ressourcen abzielen und Möglichkeiten für Einsparungen aufzeigen. Entsprechend viele Projektberichte liegen daher bereits im Themenbereich Ressourceneffizienz vor.

Eine Betrachtung und Auswertung dieser Berichte unter dem Gesichtspunkt, einen Überblick über das Spektrum durchgeführter Maßnahmen und entsprechender Erfolge zu geben, gab es bislang jedoch nicht. Ebenso lagen keine Erkenntnisse darüber vor, ob die verfügbaren quantitativen Daten in den Projektberichten eine Verdichtung und Ableitung von Benchmarks zur Ressourceneffizienz bestimmter Prozesse zulassen würden. Benchmarks können Unternehmen in die Lage versetzen, anhand geeigneter Referenzwerte ihre eigene Ressourceneffizienz einschätzen zu können. Die vorliegende Studie hat diese beiden Punkte untersucht.

Die Studie beruht auf einer Auswertung von Projektberichten aus den Quellen Cleaner Production Germany, des Umweltinnovationsprogramms (UIP), des Produktionsintegrierten Umweltschutzes PIUS, der Landesprogramme zur Ressourceneffizienz in Baden-Württemberg, des VDI Zentrum Ressourceneffizienz, der Deutschen Materialeffizienzagentur (demea) sowie auf der Auswertung von relevanten BREF-/BVT-Dokumenten.

Insgesamt lagen über 3.600 Projektberichte als Grundlage für die Auswertung vor. In einem dreistufigen Prozess wurden daher relevante und aussagekräftige Berichte für das verarbeitende Gewerbe identifiziert (Schritt 1), enthaltene Maßnahmen und Daten von 290 Berichten in einer Detailanalyse extrahiert (Schritt 2) und diese schließlich anhand verschiedener Kategorien

(bspw. Fertigungsprozesse, Prozessperipherie, Organisation) zusammengefasst und verdichtet (Schritt 3).

Bezüglich der Ableitung von Benchmarks ließ sich festhalten, dass die Projektberichte zwar quantitative Daten enthalten, eine Vergleich- und Übertragbarkeit der Daten zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich ist. Gründe (bspw. Betrachtung unterschiedlicher Ressourcen, Vielzahl von Einzelprozessen, fehlende Definition der funktionellen Einheit) wurden herausgearbeitet sowie Stärken und Schwächen bestehender Projektberichte hinsichtlich der strukturierten Datenerhebung dargestellt. Als Ergebnis wurden Anforderungen an einen harmonisierten Projektbericht bzw. an ein vereinheitlichtes Projektkennblatt erarbeitet. Finden diese Vorschläge Eingang in bestehende Projektberichte, könnte hierdurch die Ableitung von Benchmarks und auch der Benchmarking-Prozess aus Sicht von Unternehmen künftig besser unterstützt werden.

Die Auswertung der Maßnahmen ergab eine breite Übersicht über mögliche Problem-/Handlungsbereiche der Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe. Auf Ebene der Fertigungsverfahren und der Organisation wurden zahlreiche Maßnahmen zusammengetragen, verdichtet und übersichtlich dargestellt.

Bezogen auf die Fertigungsverfahren konnten Auswertungen zu folgenden Technologien getätigt werden:

- Urformen: Ein-/Aufschmelzen von Metallen für den Metallguss, Urformen von Fertigteilen und Halbzeugen aus Metallen und Nichteisen-Metallen, Urformen von Produkten aus Kunststoffen und Gummi
- Umformen: Stanzen, Kaltwalzen, Schmieden, Druckumformen
- Trennen: Drehen, Bohren, Schleifen
- Fügen: Leimen, Kleben von Holz/Papier
- Beschichten: Lackieren, Galvanisieren
- Stoffeigenschaften ändern: wärmebehandelnde Verfahren wie Glühen, Härten und Vergüten

- Verfahrenstechnische Prozesse: Herstellung von Grundchemikalien, Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien, Raffinerien, Herstellung von Zellstoff und Papier, Herstellung von Eisen und Nichteisen-Metall, Herstellung von Textilien

Die Maßnahmenkategorien umfassen dabei ein breites Repertoire beispielsweise:

- Optimierung der Prozesssteuerung
- Einsatz und Optimierung von Simulationswerkzeugen
- Nutzung von Abwärme
- Verfahrensoptimierung
- Wiedereinsatz von Reststoffen
- Optimierung der Energiebereitstellung
- Veränderung des Produktionsmaterials
- bedarfsgerechte Dimensionierung und Steuerung
- Vereinfachung/Verkürzung von Prozessketten
- Änderung/Optimierung in der Produktentwicklung
- Maßnahmen in der Qualitätssicherung, des Lagerwesens und Logistik

Die Aufbereitung und Kategorisierung der Maßnahmen soll Unternehmen letztlich auf mögliche Handlungsbereiche aufmerksam machen und typische Maßnahmen bezogen auf verschiedene Produktionsbereiche (bspw. Produktionsplanung/-steuerung, Prozessperipherie, Prozessschritte/-ketten) an die Hand geben.

Der erarbeitete Vorschlag zur Verbesserung der Datengrundlage durch die Projektdokumentationen unterstützt eine systematische Erfassung und Dokumentation allgemeiner Unternehmensdaten, der Projektcharakterisierung, der Technologie bzw. Maßnahme sowie der systematischen Darstellung der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Bezug zu Produkt/Prozess/funktionaler Einheit. Eine derartige Projektdokumentation könnte künftig die Ermittlung qualifizierter Benchmarks unterstützen.

6 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

AGEB. AG Energiebilanzen e.V.: Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2012. Verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2012.html>

Amecke H.B. (1987): Chemiewirtschaft im Überblick. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim

Blaß E. (1984): VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen GVC – gestern-heute-morgen. Saur, Düsseldorf.

Blesl M., Kessler A. (2013): Energieeffizienz in der Industrie. Springer Verlag Berlin Heidelberg

Bührig-Polaczek, A.; Michaeli, W. ; Spur, G. (2014): Handbuch Urformen. 1. Aufl. Hanser, München, 2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005): Ökologische und ökonomische Optimierung des Kupolofen-Schmelz-Prozesses durch den Einsatz von Erdgas/ Sauerstoff-Brennern bei gleichzeitig möglicher Feststoffinjektion (Abschlussbericht). 2005. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/29359_-_Abschlussbericht.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2008): Einsatz von virtuellen Entwicklungswerkzeugen für die nachhaltige Verarbeitung von Mehrphasenwerkstoffen am Beispiel der Herstellung von Gießereikernen (Abschlussbericht). 2008. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI05008_-_Abschlussbericht.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2009a): Neuartige filterhilfstofffreie Schmiermittelpflege zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der stahl- und metall-verarbeitenden Industrie (Abschlussbericht). Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI05167_-_Abschlussbericht.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2009b):

CO₂-Reduktion durch den Einsatz von SVK-Elektroden für die Chlor-Alkali-Elektrolyse. Verfügbar unter: <http://bit.ly/1GG5raB>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-

sicherheit (2005): Produktionsanlage zur Trockenbearbeitung von Aluminiumrädern und -Teilen mit geschlossener Kreislaufführung der Al-Späne (Abschlussbericht). Verfügbar unter: <http://bit.ly/1OvhW0y>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und

Reaktorsicherheit (2008): Sandaufbereitung in einer Aluminium-Sandgießerei (Abschlussbericht). 2008.

Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20126_Ohm-Haener.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-

sicherheit (2009a): Abwärmenutzung bei einem Kupolofen (Abschlussbericht). 2009. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_Demo_-_001569_Georg_Fischer_Automobilguss.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-

sicherheit (2009b): Trockenbeleimung als umweltschonendes Verfahren für die Herstellung von Holzfaserplatten (Abschlussbericht). Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20091__EGGER.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-

sicherheit (2011): Einsatz einer energieeffizienten Pfannenaufheizstation bei der Herstellung von Edelstahl (Abschlussbericht). 2011. Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht_20182_Edelstahlwerke_Schmees_01.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): Innovative getaktete Fertigung von wärmebehandelten Stanz-Biege-Teilen (Abschlussbericht). 2013. Verfügbar unter: http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/131113_abschlussbericht-final.pdf

Destatis (2013): Statistisches Bundesamt, Kennzahlen der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes 2013. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Zahlen-Fakten/Wirtschaftsbereiche/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Tabellen/KennzahlenVerarbeitendesGewerbe.html>

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2004a): Sensorlose Regelung für eine elektronisch gesteuerte Folienreckmaschine (Abschlussbericht). Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-18168.pdf>

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2004b): Entwicklung eines Energie sparenden Verfahrens zum maschinellen Klebebinden (Projektkennblatt). Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/PDF-Files/A-18926.pdf>

Dietz, Dr. Andreas (2012): Vorsprung durch kombinierte Oberflächen in JOT Journal für Oberflächentechnik, June 2012, Volume 52, Issue 2 Supplement

DIN (2003): Norm DIN 8580 09.2003: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.

Eni (2015): Funktion und Zusammensetzung von Schmierstoffen. Verfügbar unter: http://www.eni.com/de_DE/products-services/automotive-lubricants/lubricant-know-how/function-composition/function-composition.shtml

Eversheim W. (2002): Organisation in der Produktionstechnik (Bd. 3). Düsseldorf: VDI.

Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G. (2014): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren: Edition Handbuch der Fertigungstechnik. Hanser, München.

- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung**
ISI (2006): Mitteilungen aus der Produktionsinnovations-
erhebung. Nummer 39. August 2006. Technologietrends
in der Produktion.
- Gaida, Bernhard (2013):** Einführung in die Galvanotechnik:
Grundlagen der chemischen, elektrochemischen,
physikalischen und elektrotechnischen Begriffe. Leuze, E
G; Auflage: 10., Aufl. (2013)
- Grote, K.; Feldhusen, J. (2014):** Dubbel – Taschenbuch für
den Maschinenbau 24., aktual. und erw. Aufl.. Springer,
Berlin; Heidelberg.
- Hirschberg H. G. (1999):** Handbuch Verfahrenstechnik und
Anlagenbau. Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit.
Springer, Berlin und Heidelberg
- Institut für Ressourceneffizienz ifre (2014):** Optimierte
Beschaffung und Logistik. Gefunden unter: [http://www.
ifre.eu/optimierte-beschaffung.html](http://www.ifre.eu/optimierte-beschaffung.html)
- Kosmol, J.; Kanthak, J. (2012):** Glossar zum Ressourcen-
schutz, unter www.umweltbundesamt.de (abgerufen am
10.11.2014). Umweltbundesamt (UBA) (2002): Nachhaltige
Entwicklung in Deutschland – Die Zukunft dauerhaft
umweltgerecht gestalten. Erich Schmidt Verlag GmbH &
Co., Berlin.
- Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; u.a. (2008):**
Energieeffizienz in der Produktion : Abschlussbericht.
Untersuchungen zum Handlungs- und Forschungsbedarf;
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten
Forschung, München.
- Neumüller O.A. (1983):** Römpps Chemie Lexikon, Frank'sche
Verlagshandlung, Stuttgart, 8. Auflage, S. 1249.
- Schmidt M.; Schneider M. (2010):** Kosteneinsparungen durch
Ressourceneffizienz in produzierenden Unternehmen.
Springer-Verlag 2010

Seßler, Berthold (2012): Materialverluste wirksam begrenzen.
In: JOT Journal für Oberflächentechnik March 2012,
Volume 52, Issue 3

Umweltbundesamt (2005): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung – Merkblatt zu den besten verfügbaren Techniken für die Oberflächenbehandlung von Metallen und Kunststoffen, September 2005. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_galvanik_zf.pdf

Umweltbundesamt (2008): Umsetzung eines innovativen energieeffizienten Aluminiumbolzenerwärmungsverfahrens (Abschlussbericht). Verfügbar unter: http://www.cleaner-production.de/index.php?id=73&L=0&tx_exozetcpgproject_projects%5Bcat%5D=2582&tx_exozetcpgproject_projects%5Bpage%5D=1&tx_exozetcpgproject_projects%5Bid%5D=36185&cHash=1dd0a031df85b78d705369a6d80f09a6

Umweltbundesamt (2010): http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/ab_optiservice.pdf

Umweltbundesamt UBA (2013): Chlor-Alkali-Anlagen.
Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/chemische-erzeugnisse-raffinerien/chlor-alkali-anlagen>

Umweltbundesamt UBA (2014a): Zahlen und Fakten zur chemischen Industrie. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien-in-der-umwelt/zahlen-fakten-zu-chemikalien-zur-chemischen>

Umweltbundesamt UBA (2014b): Abfallvermeidung bei Produktionen für organische Spezialchemikalien durch den Einsatz hochspezifischer Katalysatoren. Gefunden unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abfallvermeidung-bei-produktionen-fuer-organische-0>

- Umweltbundesamt UBA (2014c):** Raffinerien. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abfallvermeidung-bei-produktionen-fuer-organische->
- Umweltbundesamt UBA (2014d):** Zellstoff- und Papierindustrie. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieb Branchen/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie>
- Umweltbundesamt UBA (2014e):** Textilindustrie. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieb Branchen/textilindustrie>
- Umweltbundesamt UBA (2014f):** Nichteisenmetallindustrie. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieb Branchen/herstellung-verarbeitung-von-metallen/nichteisenmetallindustrie>

- Umweltbundesamt UBA (2014g):** Herstellung und Verarbeitung von Metallen. Gefunden unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieb Branchen/herstellung-verarbeitung-von-metallen>
- UPM (2015):** Sinkender Wasserverbrauch. Gefunden unter: <http://www.upm.com/de/verantwortung/grundsatzes/umweltsleistung/wasser/Pages/default.aspx>
- VDI (2014):** Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 – Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien, Strategien.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2013):** Analyse von Potenzialen der Material und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2014):** Analyse von Ressourceneffizienzpotenzialen in KMU der chemischen Industrie. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH.
- Verband Deutscher Papierfabriken VDP (2014):** Papierindustrie mit leichtem Wachstum. Gefunden unter: <http://www.vdp-online.de/de/>
- Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) (2011):** Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie im Jahr 2010. Frankfurt am Main.
- Wilden, J.; Weise, C. (2010):** ENERWELD schweißt zusammen – mit effizienten Konzepten und Technologien. Intelligenter Produzieren 2010/3.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2008):** Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen – Erstellung eines Glossars zum „Ressourcenbegriff“ und Berechnung von fehlenden Kennzahlen des Ressourcenverbrauchs für die weitere politische Analyse. In: Forschungsbericht 363 01 134 UBA-FB 001103

7 ANHANG I – VORSCHLAG FÜR PROJEKTBERICHTSBLATT

Allgemeine Unternehmensdaten	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Name und Adresse des projektierten Unternehmens (Standort / Werk)	-
Branche	Wirtschaftszweige (WZL) oder NACE-Code
Unternehmensgröße	(Definition gemäß EU-Kommission (Hrsg.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG) < 10 Mitarbeiter 10 < 50 Mitarbeiter 50 < 250 Mitarbeiter > 250 Mitarbeiter
Unternehmensumsatz	(Definition gemäß EU-Kommission (Hrsg.): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003/361/EG) < 2 Mio. €, 2 < 10 Mio. €, 10 < 50 Mio. €, > 50 Mio. €
Produktportfolio (im Spektrum des projektierten Produktionsprozesses)	Nennung / Darstellung der Hauptprodukte
Prozessportfolio (im Spektrum des projektierten Produktionsprozesses)	Nennung wesentlicher Produktionsprozesse (zumindest auf Ebene von Hauptgruppen wie bspw. nach DIN 8580)

Projektcharakterisierung	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Projekttitel	-
Ausgangssituation	Kurzbeschreibung der Problemstellung und der (betrachteten) Verlustquellen (differenziert nach Ressourcen) ggf. inkl. Beschreibung des IST-Prozessablaufes
Zielsetzung	Qualitative Beschreibung der Zielsetzung des Vorhabens
Nutzenskizzierung	Qualitative Beschreibung des Nutzens insbesondere in welchen Phasen eine Ressourceneinsparung erzielt wird / wurde und ob damit eine (einmalige / kontinuierliche) Kostenveränderung verbunden ist (bspw. Senkung der Herstellungskosten, geringerer Energieverbrauch während der Nutzungsphase). Unter der Projektcharakterisierung sollte die Nutzenskizzierung auf Ebene des Gesamtprojekts erfolgen und auch die Beschreibung grundsätzlicher Anwendungsgebiete und der Übertragbarkeit beinhalten (bspw. im Falle von Beschichtungsentwicklungen, wo diese zum Einsatz kommen können).
Aufwand / Investitionen	Sofern Zahlen verfügbar sollte hier die nötigen Investitionen für das Gesamtprojekt ausgewiesen werden. Hierbei sollte vorrangig auf Sachmittel und entsprechende Dienstleistungen (bspw. Installation) abgestellt werden.
Verbesserungsbereich	Kurzbeschreibung in welchem Bereich die Ressourceneffizienzoptimierung ansetzt (bspw. Produktgestaltung, Fertigungsverfahren / Werkzeugentwicklung, Produktionsperipherie oder Organisation)
Art der Optimierung	Beschreibung der grundsätzlichen Strategien / Hebel, die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz untersucht / umgesetzt wurden (bspw. Wiederverwendung, Kaskadennutzung, Lebensdauerverlängerung).
Projektart	Hinweis, ob quantitative Daten verfügbar sind und in welchem Rahmen diese erhoben wurden. Eine mögliche Kategorisierung könnte anhand von Potenzialanalyse Implementierungsprojekt Forschungsprojekt ohne Umsetzung (bspw. Konzeptentwicklung, Machbarkeitsstudien, Methodenentwicklung etc.) Forschungsprojekt mit Umsetzung (Demonstration / Demonstrator) erfolgen.
Projektjahrgang	Angabe der Projektlaufzeit und insbesondere das Jahr des Projektabschlusses. Zur Beurteilung der Aktualität von Ergebnissen, Informationen und Daten.

Darstellung der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Bezug zu Produkt/Prozess/funktionaler Einheit (Fortsetzung)	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Beschreibung und Auflistung der Einzelmaßnahmen im Projekt	Die Beschreibung der Maßnahmen sollte detailliert und prägnant erfolgen und die verbessernde Aktivität, das konkrete, betroffene Objekt sowie eine Verortung im betrachteten Prozess (Prozessschritt) umfassen.
Zielsetzung und Nutzen der Maßnahme	Idealerweise wird zusätzlich die Zielsetzung der einzelnen Maßnahme (auch im Zusammenspiel mit weiteren Maßnahmen) beschrieben. Falls möglich sollte darin auch der spezifische „Nutzen“ vermerkt werden (beispielsweise „Reduktion des Energieverbrauchs für die Druckluftherzeugung um 3 %“).
Status der Maßnahme (optional)	Wenn Maßnahmen im Projekt vorgesehen waren, jedoch im Laufe der Untersuchungen verworfen wurden, wäre es dennoch hilfreich diese unter Angabe der konkreten Gründe kurz zu dokumentieren (bspw. Amortisationsdauer liegt über 5 Jahre und wurde nicht akzeptiert).
Art der Optimierung	Ähnlich wie bei der Projektcharakterisierung sollte hier pro Maßnahme die grundsätzliche Strategie / Hebel, die zur Verbesserung der Ressourceneffizienz umgesetzt / vorgeschlagen wurde, per Kategorie zugewiesen werden: Möglichkeiten hierfür sind: Substitution / Wechsel Wiederverwendung Optimiertes Verfahren (Reduzierung) Optimiertes Verfahren (Steigerung) Verwertung (stofflich, energetisch) Weiterverwendung / Kaskadennutzung
Kategorisierung des Bereichs der Maßnahme	Ausgehend von einer ersten Verortung der Maßnahme (siehe oben), ist es sinnvoll, die Maßnahme nach ihrem Ansatzpunkt zu kategorisieren und den Kontext / Bereich näher zu beschreiben: 1. Handelt es sich um organisatorische Optimierungen wie z.B. Reduzierung von Ausschüssen durch stärkere visuelle Kontrollen, bessere / genauere Ansteuerung von Maschinen, Vereinheitlichung von Informationsflüssen. Also alle Maßnahmen die eher die Organisation der Produktion betreffen und nicht in die Fertigungstechnologie an sich eingreifen. 2. Maßnahmen, die bereits in der Produktentwicklung ergriffen werden und Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch in der Produktion haben. 3. Die Maßnahme setzt im Herstellungsprozess an, wobei zwischen dem Produktionsumfeld (wie zum Beispiel Heizung, Druckluftherzeugung, Kühlschmiermittelaufbereitung oder Beleuchtung) d.h. zwischen unterstützenden Prozessen und den primären Herstellungsprozessen unterschieden werden sollte. Setzt die Maßnahme im primären Herstellungsprozess an, sollte das zugeordnete Fertigungsverfahren (bspw. nach DIN 8580) genannt werden.

Darstellung der Ressourceneffizienzmaßnahmen mit Bezug zu Produkt/Prozess/funktionaler Einheit (Fortsetzung)	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Nennung / Spezifizierung und Kategorisierung der betroffenen Ressourcen	Pro Maßnahme sollte zudem die Ressource benannt werden, die beeinflusst wird / werden soll. Weiterhin ist es für eine Verdichtung der Daten sinnvoll, die jeweilige Ressource zu kategorisieren beispielsweise anhand von: Natürliche Ressource (Luft, Wasser) Rohstoffe ((Produktions-) Material) Hilfsstoffe ((Produktions-) Material) Betriebsstoffe ((Produktions-) Material) Energie (Strom, Wärme, Kälte, Druckluft, Öl, Gas)
Aufwand / spezifische Investitionen	Um Unternehmen den Nutzen einer Maßnahme zu verdeutlichen, ist es notwendig einen ungefähren Richtwert hinsichtlich Aufwand / Kosten (Sachmittel, Dienstleistungskosten wie Installation) pro Maßnahme zu erfassen.

Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Benennung der Ressourcen (vor Maßnahme)	Nennung der Ressourcen, die durch eine Maßnahme beeinflusst wird. Hierbei sollte die betrachtete Ressource klar abgegrenzt / definiert werden. ⁹⁰
Beschreibung der Systemgrenzen	Nennung / Beschreibung des Prozesses / der wesentlichen Prozessschritte, die Gegenstand der Betrachtung sind.
Nutzenbeschreibung	Zumindest qualitative Beschreibung des (Zwischen-)Produkts und der wesentlichen Eigenschaften / Funktionen, die als Output aus den beschriebenen Systemgrenzen resultieren
Menge der Ressource (vor Maßnahme)	Angabe der Menge / des Verbrauchs pro Ressource in absoluten Zahlen (idealerweise werden daneben Angaben dazu gemacht wie die Messung der Verbräuche / Mengen durchgeführt wurde)
Kosten für die genannte Ressource (vor Maßnahme) (optional)	Sofern möglich sollten hier die Kosten pro Ressource angegeben und spezifiziert werden (bspw. Materialkosten, Entsorgungskosten). Die monetäre Bewertung ist gegenüber der Sachebene (Mengenangaben) jedoch nachrangig.
Maßnahmenzuordnung	Hier sollten Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenbündel vermerkt werden, die den jeweiligen Ressourcenverbrauch beeinflussen. Dies könnte weitgehend den Angaben entsprechen, die bereits unter der Maßnahmencharakterisierung gemacht wurden. Aufgrund des Zuordnungsproblems ist es jedoch sinnvoll, an dieser Stelle relevante Maßnahmen nochmals stichwortartig aufzulisten. Zudem soll hier aus Sicht der Ressource dokumentiert werden, welche Maßnahmen kumuliert angewendet wurden.

⁹⁰ Hier kann wiederum auf die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 verwiesen werden, die entsprechende Definitionen für die einzelnen Ressourcen bereitstellt.

Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz (Fortsetzung)	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Kategorisierung der Ressourcenwirkung	Eine Kategorisierung der Wirkung der ergriffenen Maßnahmen auf die jeweilige Ressource ist teilweise nötig, da in den Maßnahmenbeschreibungen nicht immer unmittelbar ersichtlich ist, wodurch ein geringere Ressourceninanspruchnahme erzielt wurde. Wird eine Ressource als Ergebnis beispielsweise in einem Prozess nicht mehr benötigt, sollte festgestellt werden ob die Ressource substituiert, anderweitig nutzbar gemacht etc. wurde. Mögliche Kategorien sind: - teilweise Reduzierung - vollständige Reduzierung - Substitution - Nutzbarmachung - Steigerung (Mehrverbrauch) - Steigerung der Ausbeute
Benennung der Ressource (nach Maßnahme)	Mitunter werden Ressourcen im Zuge der Maßnahmen substituiert, in anderer Form nutzbar gemacht oder es treten weitere Ressourcen hinzu etc. Daher soll an dieser Stelle die Ressource (wie oben) nochmals nach der Maßnahme benannt werden.
Beschreibung der Systemgrenzen (nach Maßnahme)	Für den Fall, dass sich betrachtete Systemgrenzen innerhalb des Projektes verschoben haben oder Ressourcen das ursprüngliche Betrachtungssystem verlassen
Nutzenbeschreibung	Hier sollte kurz beschrieben werden, ob der ursprüngliche, definierte Nutzen durch die ergriffenen Maßnahmen verändert wurde. Wiederum ist hier zumindest eine qualitative Beschreibung des (Zwischen-)Produkts und der wesentlichen Eigenschaften / Funktionen, die als Output aus den beschriebenen Systemgrenzen resultieren hilfreich.
Menge der Ressource (nach Maßnahme)	Wie oben – allerdings sind hier die Mengen nach Maßnahmendurchführung erforderlich (wiederum sollten hier Angaben über die Erhebungsmethoden gemacht werden). Zudem sollte hier darauf hingewiesen werden, ob es sich um einmalige „Einsparungen“ handelt oder um „Einsparungen“, die dem Unternehmen dauerhaft erhalten bleiben.
Kosten für die genannte Ressource (nach Maßnahme) (optional)	Neben der Darstellung der Kosten nach Maßnahmendurchführung (vergleichbar wie oben), sollte an dieser Stelle ebenfalls darauf hingewiesen werden, ob es sich um einmalige Einsparungen handelt oder um dauerhafte Kosteneinsparungen.
Höhe der Effizienzsteigerung pro Ressource (Menge in %) (optional)	Sollten absolute Angaben beispielsweise aus betrieblichen Gründen nicht möglich sein, so könnten hier zumindest relative Veränderungen vermerkt werden.
Höhe der Effizienzsteigerung pro Ressource (monetär in %) (optional)	Wie oben – sollten absolute Angaben beispielsweise aus betrieblichen Gründen nicht möglich sein, so könnten hier zumindest relative Veränderungen vermerkt werden.

Darstellung der erreichten Ressourceneffizienz (Fortsetzung)	
Kategorie	Ergänzende Informationen
Auswirkungen von Maßnahmen auf andere Prozesszielgrößen (Prozessstabilität)	Im Falle von punktuellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen sollten an dieser Stelle kurz die (möglichen) Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Prozesse beschrieben werden. Insbesondere sollten Einflüsse auf Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen den Prozessen dargestellt werden, die das Gesamtergebnis bzw. die gesamte Leistungsfähigkeit eines Prozesses beeinflussen wie z.B.: Auswirkung einer umgesetzten Maßnahme auf die gesamte Produktivität einer Anlage, auf die Ausbeute und die Qualität des Endproduktes
Auswirkungen von Maßnahmen auf andere Ressourcenströme	Nennung von zusätzlichen positiven/ negativen ökologischen Auswirkungen der getätigten Effizienzmaßnahmen die nicht Teil der Zielsetzung waren: Wie werden andere Faktoren (Ressourcenströme) beeinflusst? Verschlechterung anderer Faktoren wie z.B. eine Steigerung von CO ₂ Emissionen, eine Erhöhung von Schadstoffen in die Umwelt etc.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30 27 59 506 0
Fax +49 30 27 59 506 30
info@vdi-zre.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE