



**TU Clausthal**  
Clausthal University of Technology

Systemkonzeptionierung von Großschredderanlagen im  
Metall- und Schrottreycling unter dem Einfluss  
umweltschutzrechtlicher Änderungen

Dissertation

zum Erlangen des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. Torben Krafczyk  
aus Hamburg

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung: 04. März 2020

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Dekan:	Prof. Dr. Bernd Lehmann
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. Inge Wulf
Hauptberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Mitberichterstatter:	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger

### **Dissertation Technische Universität Clausthal 2020**

#### **D 104**

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2020  
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.papierflieger.eu](http://www.papierflieger.eu)

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

**ISBN 978-3-86948-757-1**

„Like the Phoenix, I have risen from the ashes. And into my fire, you shall fall.“

TMNT S01 Ep18 – The Shredder Strikes Back Part 2



## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Technischer Leiter der TSR Recycling GmbH & Co. KG des Regionalbereichs Südwest im Zeitraum Oktober 2016 bis Dezember 2019.

Für die Ermöglichung und wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann. Sein umfangreiches Arbeitsgebiet und die Fülle an universitären Betreuungs- und Forschungsaufgaben haben ihn nicht davon abgehalten, die entscheidende Dosis an Zeit und Rat für meine Person aufzubringen.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger danke ich für die Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen. Ein Zeichen dafür, dass das Thema Recycling über Ländergrenzen hinaus verbindet.

Des Weiteren gilt mein Dank der TSR Recycling GmbH & Co. KG, die diese berufsbegleitende Promotion in erster Instanz ermöglichte. Im Zuge dessen bedanke ich mich bei meinem Mentor Werner Röck für sein Gespür die Leine immer auf der richtigen Länge zu halten, Michael Butt für den Fuß in der entscheidenden Tür und Daniel Stevens dafür, dass er einfach er ist.

Bernd Lowigus danke ich für meine intensive technische Ausbildung am Schraubenschlüssel und dafür, dass er mir im entscheidenden Moment dieser persönlichen und akademischen Entwicklungsphase, den Rücken freigehalten hat.

Meinen geschätzten Kollegen und Experten aus den unterschiedlichen operativen und universitären Fachbereichen Recyclingtechnik, Umweltrecht und Wirtschaftswissenschaften sei für Ihre Geduld, den intensiven geistigen Beitrag und die offene Diskussionsbereitschaft gedankt. Ohne Prof. Dr.-Ing. Tobias Elwert (Duesenfeld GmbH), Peter Flormann (EuRic Fachgruppe „waste and chemicals“), Dr.-Ing. Sebastian Jeanvre´ (Hochschule Pforzheim), Dr. rer. nat. Philipp Kempkes (REMONDIS Assets & Services GmbH) und Philipp Wach (Hochschule Ludwigshafen) hätte diese interdisziplinäre Arbeit nicht ihre fachliche Reife erlangt.

Nichts ist so stark, wie eine liebende Familie und die eine Hand voll Freunde, für die kein Weg zu weit ist. Ich danke euch. Bester Freund, bester Bruder!

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen der neuen umweltschutzrechtlichen Forderungen des BREF für Abfallbehandlungsanlagen und des TA Luft-Entwurfes aus dem Jahre 2018 auf den Betrieb und die technische Weiterentwicklung von Großschredderanlagen in Deutschland.

In ihr werden sowohl formalrechtliche, verfahrenstechnische als auch wirtschaftswissenschaftliche Aspekte des wertstromorientierten Schredderprozesses untersucht und in einem übergeordneten Systemkonzept zusammengeführt. Der Fokus liegt dabei in der Argumentation und Bewertung technischer Herausforderungen in Folge der Anwendung des europäischen und nationalen Regelwerks in Zeiten volatiler Marktstrukturen, im konjunkturellen Abwärtstrend der industriellen Wirtschaft und unter einem zunehmenden Wertstoffverfall des Inputstroms am Schredder.

Der genannte Entwicklungsprozess umfasst neben der betriebs- und umweltschutzrechtlichen Evaluation, die Risikobewertung von Langzeitinvestitionen im Altanlagensegment. Er verbindet technische und zukunftsgerichtete Optimierungen in Abluft- und Umwelteinrichtungen mit strategischen Managemententscheidungen und zeigt auf, dass die aktuellen Gegebenheiten einen wesentlichen Einfluss auf den Fortbestand der industriellen Großschredder in Deutschland haben. Damit birgt die Weiterentwicklung von Schredderanlagen zur Eisen-, Konsumgüter und Metallschrottaufbereitung neben genehmigungsrechtlichen vor allem wirtschaftliche Risiken. Die Zunahme der Entsorgungsmengen zur thermischen Verwertung wird darüber hinaus zum Indikator des wertstofflichen Verfalls im Massenstrom, welcher wiederum die Emissionspotentiale am Schredder steigert und die Optionen im Absatz senkt.

Langfristig werden massenleistungsfähige Großschredderanlagen mit einer Antriebsleistung größer 3.000 bis 4.000 PS in Deutschland nur dann bestehen können, wenn beste verfügbare Techniken und das Stoffstrommanagement an diesen Anlagen, dem Anspruch einer modernen „Circular Economy“ gerecht werden. Das bedeutet konkret, dass der Schredderprozess in seiner Produktionsstruktur und im Sinne des Klimaschutzes, ressourcenschonend, energie- und kosteneffizient ausgelegt wird, eine systemübergreifende Prozessdigitalisierung zulässt und die Dynamik des Marktes sowie die stoffliche Entwicklung des Vormaterialgefüges, kurzfristig durch eine prozessorientiert nachhaltige Einkaufs- und Vertriebsstrategie auffängt.

---

## Abstract

The present work deals with possible effects of renewed legislative amendments in air pollution control to shredder emissions. Such amendments raise concerns related to the technical development of shredder operations in scrap and metal recycling under the present legislation of the European BREF for Waste Treatment and the 2018 draft version of the Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft) in Germany.

Formal legal prerequisites, process engineering and economical aspects of the value stream oriented shredder process, constitute the prime focus of this work. They are being merged into a superordinated system concept. Its focus lies in the argumentation and evaluation of technical challenges as a major result of the implementation of legal terms in the age of volatile market conditions, present recession and value decline in pre-material compositions.

The development process comprises operational, as well as environmental evaluation of older facilities as part of a risk management plan over future investments in the shredder sector. This work outlines the connection between future oriented optimization in advanced air treatment and environmental protection technologies with the need for strategic management decisions. The findings of this study show that the present operational constraints do have a major influence on the survival of industrial mega shredders in Germany.

The advancement of shredder plants in the ferrous, consumer goods and metal scrap treatment/processing are subject to risks in licensing as well as in profitability. The increase of disposable volumes serves as an indicator of the value decline in the pre-material flow, which increases emissions and therefore decreases turnover options.

The long-term perspective or existence of capacity-efficient mega shredders with a drive power larger than 3.000 to 4.000 hp, is bound to best available techniques and future oriented waste stream management strategies, which follow a modern interpretation of the circular economy. This means that the shredder process itself has to be resource-friendly, energy- and cost-efficient while still following the statuated emission limit values. The implementation of system-overlapping process digitalisation and process-oriented sales strategies will help to manage market dynamics as well as the development of the shredder pre-material in the future.

## **Erklärung**

Ich versichere an Eides statt, dass ich die Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die wörtliche oder sinngemäße Übernahme von Abschnitten aus Texten Dritter habe ich kenntlich gemacht.

Mannheim, den 19. Dezember 2019

---

Torben Krafczyk



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung .....	III
Kurzfassung .....	IV
Abstract.....	V
Erklärung.....	VI
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XIV
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
Symbol- und Einheitenverzeichnis.....	XXI
Formelverzeichnis .....	XXIII
1 Einleitung .....	1
2 Rechtliche Rahmenbedingungen an Schredderanlagen.....	4
2.1 Umweltrecht.....	4
2.2 Europäisches Umweltrecht .....	6
2.2.1 BREF für Abfallbehandlungsanlagen.....	7
2.2.2 BVT-Merkblätter .....	8
2.2.3 BVT-Schlussfolgerungen.....	9
2.3 Nationales Umweltrecht (Bundesrecht).....	10
2.3.1 BImSchG.....	10
2.3.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	11
2.3.3 ElektroG2.....	12
2.3.4 Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV).....	13
2.4 Betreiberpflichten an IED-Anlagen .....	13
2.5 Behördenpflichten für IED-Anlagen.....	14
2.6 Normung und Messverfahren in der Luft.....	15
2.7 TA Luft.....	16
2.8 Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).....	17
3 Stand der Technik an Schredderanlagen .....	18
3.1 Produktionssystem Schrottplatz .....	18
3.2 Schredderprozess und Fertigungssegmentierung.....	19
3.3 Großschredderanlagen im Schrottreycling .....	21
3.3.1 Produktionsanforderungen an den Schredder .....	24
3.3.2 Schredderaggregat und Peripherie.....	25
4 Wirtschaftliche Strukturen an Schredderanlagen.....	35
4.1 Marktbericht Schrott- und Metallrecycling an Schreddern .....	35

4.2	Wirtschaftlichkeit von Schredderanlagen .....	40
4.3	Produktionscontrolling an Schredderanlagen .....	42
4.3.1	Kosten und Leistungsrechnung an Schredderanlagen .....	43
4.3.2	Nicht-monetäre Kennzahlen .....	44
4.3.3	Betriebsdaten an Schredderanlagen .....	46
5	Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen.....	48
5.1	Sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen .....	48
5.2	Methodik: Prozessmanagement als systemisches Vorgehen .....	51
5.3	Ergebnisbewertung: Risikomanagement als Weg zur Entscheidungsfindung...	53
6	Neue umweltschutzrechtliche Anforderungen für Schredderanlagen.....	54
6.1	Säule 1: Europäische und nationale Gesetzgebung.....	54
6.2	Novelle des BREF für Abfallbehandlungsanlagen aus 2018 .....	55
6.2.1	BVT 1: Umweltmanagementsystem .....	57
6.2.2	BVT 2: Verbesserung der Umwelleistungen .....	58
6.2.3	BVT 3: Emissionsquellenverzeichnis .....	59
6.2.4	BVT 4: Abfallagerung .....	60
6.2.5	BVT 5: Abfallumschlag .....	61
6.2.6	BVT 6 bis 12: Emissionsgrenzen Wasser .....	61
6.2.7	BVT 8: Emissionsgrenzen Luft .....	63
6.2.8	BVT 11: Roh- und Reststoffbilanzierung.....	67
6.2.9	BVT 14: Emissionsminderungsmaßnahmen Luft.....	67
6.2.10	BVT 26 und 27: Unfälle und Ereignisse .....	68
6.2.11	BVT 15 und 16: Abfackeln von Prozessgas.....	69
6.2.12	BVT 17 und 18: Emissionen Lärm und Erschütterungen .....	69
6.2.13	BVT 22 bis 24: Effizienzplanung.....	70
6.3	Novelle der TA Luft Stand 16.07.2018 .....	71
6.3.1	Entwicklung der TA Luft Novelle.....	71
6.3.2	Nummern 5.4.8.9.1 und 5.4.8.9.12: Schredderanlagen .....	73
6.3.3	Einzelmessungen.....	78
6.3.4	Kontinuierliche Messungen .....	79
6.3.5	Anlagen- und Betriebsgenehmigung .....	80
6.4	Fazit zum Umweltschutz an Schredderanlagen .....	84
6.5	Säule 2: Bestandsgenehmigung .....	88
7	Abluftmessungen an Schredderanlagen.....	92
7.1	Säule 3: Emissionsgrenzwerte und Messungen.....	92
7.2	Messtechnik an Schredderanlagen .....	93

---

7.3	Messhistorie an Schredderanlagen der TSR.....	94
7.3.1	Gesamtstaubmessungen an Schredderanlagen der TSR.....	97
7.3.2	Staubinhaltsstoffe an Schredderanlagen der TSR.....	101
7.3.3	TVOC-Messungen an Schredderanlagen der TSR.....	103
7.3.4	TVOC-Sondermessungen an Schredderanlagen der TSR.....	107
7.4	Emissionsmessungen an Schredderanlagen.....	113
8	Herausforderungen in der Schredderbestandstechnik.....	116
8.1	Säule 4: Bestandstechnik.....	116
8.2	Technologische und operative Entwicklungsfelder des Bestandssystems.....	117
8.2.1	UMS an Schredderanlagen.....	118
8.2.2	Maßnahmen zu gefassten Emissionen an Schreddern.....	126
8.2.3	Neues Leistungsverzeichnis für Schredderanlagen.....	128
8.3	Effektiver Nachweis von Entwicklungsfeldern in der Schredderbestandstechnik.....	130
8.3.1	Kennzahlensystem an Schredderanlagen.....	130
8.3.2	Schreddertool für die Produktionsüberwachung.....	142
8.3.3	Simulationstool für die Anlagenplanung.....	154
9	Weiterentwicklung von Schredderanlagen.....	156
9.1	Säule 5: Technologien und Innovationen.....	156
9.2	Technische Auslegung der Schredderanlage.....	158
9.2.1	Maschinendesign.....	161
9.2.2	Maßnahmen zur TVOC-Reduktion in der Schredderabluft.....	164
9.2.3	Maßnahmen in der Sortiertechnik.....	182
9.2.4	Maßnahmen in der Prozessdigitalisierung.....	208
9.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch Anwendung des Simulationstools.....	215
10	Systemischer Einfluss der Weiterentwicklung von Schredderanlagen.....	222
10.1	Säule 6: Umwelt- und Genehmigungsbehörden.....	222
10.2	Strategien und Potentiale der Weiterentwicklung.....	223
11	Stoffstromentwicklung an Schredderanlagen.....	226
11.1	Säule 7: Vormaterial und Produkte.....	226
11.2	Einflussfaktor SLF.....	227
11.3	Komplexe Inhaltsstoffe im Vormaterial.....	235
11.4	Produktgestaltung im Absatz.....	245
12	Zusammenfassung und Ausblick.....	250
13	Literaturverzeichnis.....	255
Anhang	.....	265

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organisatorische Funktionen des Großschredderbetriebes .....	19
Abbildung 2: Das Produktionssystem Schrottplatz in Anlehnung an die modulare Fabrik [21] .....	20
Abbildung 3: Produktionssegmente des Schredderprozesses [24] .....	21
Abbildung 4: Liste der typischen Abfallströme an Großschredderanlagen in Anlehnung an die Produktionswirtschaft [23] .....	22
Abbildung 5: Kernoutputsorten an Schredderanlagen .....	23
Abbildung 6: Verfahrensfliessbild einer Schredderanlage in vereinfachter Darstellung .....	25
Abbildung 7: Prinzipdarstellung eines Schredders in Anlehnung an Newell Recycling Equipment ©.....	27
Abbildung 8: Prozessschritte in der mechanischen Zerkleinerung von Schrotten im Schredder in Anlehnung an Newell Recycling Equipment © .....	28
Abbildung 9: Beladungsvorgang eines AK-Festbettes in drei Schritten [32].....	32
Abbildung 10: Preisentwicklung Sorte 4 von Januar 2001 bis November 2019.....	36
Abbildung 11: Einkaufsmangerindex in Deutschland von 2014 bis Oktober 2019 .....	38
Abbildung 12: Prozentuale Verteilung der groben Inputströme an Schreddern in Deutschland 2017 [38].....	39
Abbildung 13: Die sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen [24] .....	49
Abbildung 14: Die sieben Kerneinflussfaktoren in der Wertschöpfungskette des Schredders .....	52
Abbildung 15: Säule 1: wesentliche Systembausteine in der Interpretation des Umweltrechts.....	54
Abbildung 16: TOC- und TVOC-Messhistorie an Schredderanlagen (BREF 17. August 2018).....	66
Abbildung 17: Säule 2: wesentliche Systembausteine in der Evaluation der Genehmigungslage .....	89
Abbildung 18: Theoretischer Einfluss der TVOC-Grenze von 50 mg/Nm <sup>3</sup> auf den Genehmigungsstand von Schreddern im Jahr 2017 in Deutschland in Anlehnung an [24] .....	90
Abbildung 19: Säule 3: wesentliche Systembausteine in der Beschreibung der Messtechnik .....	92
Abbildung 20: Wesentliche Emissionsquellen an Schredderanlagen und geforderte Grenzwerte gemäß TA Luft-Novelle.....	93

---

Abbildung 21: Auszug der maximalen Gesamtstaubbelastung an Schreddern von 1974 bis 2017 .....	98
Abbildung 22: Auszug der durchschnittlichen Gesamtstaubbelastung an Schreddern von 1974 bis 2017 .....	99
Abbildung 23: Auswertung der Gesamtstaubbelastung durch Mischschrott in Schreddern von 1974 bis 2017 .....	100
Abbildung 24: Auswertung der Gesamtstaubbelastung durch Karossen in Schreddern von 1974 bis 2017 .....	100
Abbildung 25: Auszug der maximalen TVOC-Belastung an Schreddern von 1974 bis 2017 .....	104
Abbildung 26: Auszug der durchschnittlichen TVOC-Belastung an Schreddern von 1974 bis 2017 .....	105
Abbildung 27: Auswertung der TVOC-Belastung durch Mischschrott in Schreddern von 1974 bis 2017 .....	106
Abbildung 28: Auswertung der TVOC-Belastung durch Karossen in Schreddern von 1974 bis 2017 .....	106
Abbildung 29: Auswertung der durchschnittlichen TVOC-Tagesmittelwerte von 2009 bis 2013 .....	108
Abbildung 30: Sortenspezifische Häufigkeitsverteilung von TVOC-Emissionen von 2008 bis 2010 .....	110
Abbildung 31: Gemittelte Häufigkeitsverteilung der TVOC-Konzentration von 2008 bis 2010 .....	111
Abbildung 32: Stoffstrombasierte Einzelauswertung von TVOC-Minutenwerten .....	112
Abbildung 33: Einzelauswertung der TVOC-Gehalte in Folge von Verpuffungen .....	112
Abbildung 34: Säule 4: wesentliche Systembausteine in der Evaluation der Bestandstechnik .....	116
Abbildung 35: Potentielle Emissionsquellen an Schredderanlagen in Anlehnung an das neue UMS .....	119
Abbildung 36: Erfassung von Verpuffungsereignissen an einem Großschredder im Zeitraum 2013 bis 2019 .....	121
Abbildung 37: Entwicklung eines Kennzahlensystems an Großschreddern [49] .....	131
Abbildung 38: Spezifische Kostenzuordnung im Schredderprozess [49] .....	133
Abbildung 39: Prozentualer Stromverbrauch Nebenantriebe im Verhältnis zum Schredder .....	139
Abbildung 40: Entwicklung eines Kennzahlensystems für Schredderanlagen .....	143
Abbildung 41: Administrative Steuerung des Abwicklungsprozesses an Schreddern ....	144
Abbildung 42: Übersicht der wesentlichen monetären Kennzahlen des Schreddertools	147

---

Abbildung 43: Grafische Darstellung der Gewinnmarge in Abhängigkeit der Produktionsmengen und -kosten am Schredder .....	148
Abbildung 44: Grafische Darstellung der Produktionskosten im Verhältnis zur OEE des Schredders .....	149
Abbildung 45: Teilauszug eines Produktionstagesberichts aus dem Schreddertool.....	152
Abbildung 46: Säule 5: wesentliche Systembausteine in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen .....	157
Abbildung 47: Produktionseinheit Schredder inklusive Baugruppenaufschlüsselung .....	163
Abbildung 48: Auszug Simulationstool für die Parametrisierung des Schredderprozesses .....	164
Abbildung 49: VOC-Reduktionseinrichtung SA Recycling LLC USA 2018 .....	167
Abbildung 50: RETOX-Dreikammer-RTO CECO Adwest Environmental Corp. ©.....	169
Abbildung 51: Auswertung des Abscheidegrades einer AK-Pilotanlage Venti Oelde GmbH von 2014 bis 2015 .....	172
Abbildung 52: Pilotanlage Fotooxidation 2016 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH ©.....	177
Abbildung 53: TVOC-Messung Pilotanlage Fotooxidation 2016 .....	178
Abbildung 54: Abbau der TVOC-Konzentration in Abhängigkeit vom Energieeintrag und der ROV-Zusammensetzung .....	179
Abbildung 55: Direkte Fotooxidation mit Glättungsstufe und ROV IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH ©.....	181
Abbildung 56: Erfassung von Schwerteilereignissen an einem Großschredder im Zeitraum 2013 bis 2019.....	184
Abbildung 57: Darstellung der Produktivitätseinbußen durch Verpuffungs- und Schwerteilereignisse.....	185
Abbildung 58: Prinzipskizze Schwerteilerkennung am Plattenband des Schredders (Gebrauchsmuster DE 297 19 600 U1) [64].....	187
Abbildung 59: Darstellung der Messwerte in der Auswertesoftware der RGI Messtechnik GmbH © .....	188
Abbildung 60: Reversiert logarithmische Darstellung der Bandbelegung RGI Messtechnik GmbH © .....	189
Abbildung 61: Testauszug der optischen Bandbelegungsdetektion am Plattenband .....	191
Abbildung 62: Heavy Picker Anwendung ZenRobotics Ltd. ©.....	193
Abbildung 63: Veränderung der Rückgewinnungsrate in Folge des erhöhten Objekttrainings ZenRobotics Ltd. ©.....	196
Abbildung 64: Verfahrensfließbildauszug dezentrale SLF Aufbereitung an Großschreddern .....	201
Abbildung 65: Mengenverteilung in der Aufbereitung einer SLF aus Karossen.....	203

---

Abbildung 66: Netzwerkarchitektur digitale Prozess- und Datenerfassung am Schredder [49] .....	210
Abbildung 67: Auszug der mobilen Wiegedatenerfassung an Schreddern.....	211
Abbildung 68: Teilauszug der kalkulatorischen Gegenüberstellung einer Anlagensimulation als Vorlage der Investitionsentscheidung.....	219
Abbildung 69: Teilauszug einer Kostenaufschlüsselung als Basis der Produktionskostenkalkulation im Entscheidungsprozess .....	219
Abbildung 70: Säule 6: wesentliche Systembausteine in der Zusammenarbeit mit den Umwelt- und Genehmigungsbehörden .....	223
Abbildung 71: Säule 7: wesentliche Systembausteine in der Beschreibung stoffstromrelevanter Einflussgrößen .....	227
Abbildung 72: Gemittelte Stoffstromverteilung an Schreddern von 2010 bis 2018.....	229
Abbildung 73: Prozentuale Entwicklung der SLF-Anteile an Schreddern von 2010 bis 2018 .....	230
Abbildung 74: Prozentuale Entwicklung der SLF-fein an Schreddern von 2010 bis 2018 .....	231
Abbildung 75: Prozentuale Entwicklung der SLF-grob an Schreddern von 2010 bis 2018 .....	231
Abbildung 76: Entsorgungspreisvergleich SLF-fein und -grob an Schreddern von 2015 bis 2019 .....	232
Abbildung 77: Preisentwicklung der SLF-fein an Schreddern von 2011 bis 2018 .....	233
Abbildung 78: Preisentwicklung der SLF-grob an Schreddern von 2011 bis 2018.....	233
Abbildung 79: Kreislaufmodell für den Einfluss der SLF-Mengen- und Entsorgungspreissteigerung .....	234
Abbildung 80: Der Einfluss komplexer Inhaltsstoffe im Schreddervormaterial.....	236
Abbildung 81: Prozentuale Entwicklung und Prognose des Fahrzeuggewichts unter Berücksichtigung des verbauten Materialmix von 1970 bis 2020 [72] .....	238

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug typischer Maschinendaten eines Schredderaggregats .....	33
Tabelle 2: Auszug typischer Betriebsdaten eines Schredderprozesses .....	46
Tabelle 3: Kernkapitel des BREF für Abfallbehandlungsanlagen vom 17. August 2018...	56
Tabelle 4: BREF Emissionsgrenzen für Direkteinleiter von Prozesswasser .....	62
Tabelle 5: BREF Emissionsgrenzen für Direkt- und Indirekteinleiter von Prozesswasser	62
Tabelle 6: BREF Emissionsgrenzen in die Luft.....	64
Tabelle 7: TA Luft-Novelle Emissionsgrenzen in die Luft.....	76
Tabelle 8: TA Luft Entwicklung der Depositionswerte .....	81
Tabelle 9: TA Luft Entwicklung der Bagatellmassenströme .....	82
Tabelle 10: Zusammenfassung BREF-relevanter Forderungen für Schredderanlagen ....	86
Tabelle 11: Zusammenfassung TA Luft-relevanter Forderungen für Schredderanlagen ..	87
Tabelle 12: Auszug von Emissionsmessungen der TSR Gruppe 1974 bis 2017.....	95
Tabelle 13: Auszug von Immissionsmessungen der TSR Gruppe 1974 bis 2017 .....	95
Tabelle 14: Massenrelevante Staubinhaltsstoffe an Schreddern von 1974 bis 2017 .....	102
Tabelle 15: Auswertung der FID-Datenerhebung von 2008 bis 2010.....	109
Tabelle 16: Energieverbrauch und -kosten pro Produktionsstunde in Abhängigkeit der installierten Leistung der Mühle .....	140
Tabelle 17: Ausschreibungsumfang Schredderkonzept in 2018 .....	160
Tabelle 18: Teilauszug der Baugruppenzuordnung und Parametrisierung an Schreddern .....	162
Tabelle 19: Messparameter für die Evaluation der AK in der Ablufttechnik an Schreddern .....	175
Tabelle 20: Materialprobenselektion für die Sensorsortierung .....	194
Tabelle 21: Ergebnisauswertung der Erkennungsphase in der Sensorsortierung .....	195
Tabelle 22: Ergebnisauswertung der Greiferperformance in der Sensorsortierung .....	196
Tabelle 23: Ergebnisse der Demonstrationsphase in der Sensorsortierung.....	197
Tabelle 24: SSF-Wertstoffverteilung in der SLF aus Karossen .....	205
Tabelle 25: SSF-Wertstoffverteilung in der SLF aus SVM .....	205
Tabelle 26: Mengenverteilung in Folge einer SLF-Sichtung aus dem Jahre 2008 .....	206
Tabelle 27: Betriebsdatenerfassung im Planungstool .....	216
Tabelle 28: Generierte Produktionsrandbedingungen der Schreddersimulation .....	217
Tabelle 29: Vergleich von Inhaltsstoffen in der SLF aus Siebung, Sichtung und der thermischen Verwertung mit gemessenen Staubinhaltsstoffen .....	243



## Abkürzungsverzeichnis

### A

AbfVerbrG	Abfallverbringungsgesetz
Abs. (§)	Absatz
AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AfA	kalkulatorische Abschreibungskosten
AK	Aktivkohle
ALARA	As Low as Reasonably Achievable (so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar)
AltfahrzeugV	Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung)
Anh. (§)	Anhang
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
Art. (§)	Artikel
Artt. f. (§)	Artikel und direkter Folgeartikel bzw. Folgenummer des Artikels
As	Arsen
AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung)
<b>B</b>	
BAB	Betriebsabrechnungsbogen
B(a)P	Benzo(a)pyren
BAT	Best Available Technique
BAT-AEL	Best Available Technique Associated Emission Levels
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BImSchG	Gesetz zum Schutz von schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
Br	Brom

BREF	Best Available Technique Reference Document, hier: BVT-Merkblatt für Abfallbehandlungsanlagen
bspw.	beispielsweise
BTEX	aromatische Kohlenwasserstoffe speziell Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole
Buchst. (§)	Buchstabe
BVT	Best Verfügbare Techniken (BAT)
bzw.	beziehungsweise
<b>C</b>	
ca.	circa
Cd	Cadmium
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CFK	carbonfaserverstärkte Kunststoffe
Cr	Chrom
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
<b>D</b>	
DecaBDE	Decabromdiphenylether
DIN	Deutsches Institut für Normung
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
dl-PCB	dioxine-like (dioxinähnliche) PCB
<b>E</b>	
EfbV	Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemein- schaften (Entsorgungsfachbetriebeverordnung)
ElektroG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz)
ELV	End-Of-Life-Vehicle (EU-Richtlinie 2000/53/EG)
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EUR	Euro
etc.	et cetera
<b>F</b>	
F	Fluor

f. (§)	inklusive des nächsten Gesetzes, Artikels oder Abschnittes
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Fe	Eisen
ff. (§)	Folgende Gesetze, Artikel oder Abschnitte
FID	Flammenionisationsdetektor
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Auswirkungsanalyse)
<b>G</b>	
GFK	glasfaserverstärkte Kunststoffe
ggf.	gegebenenfalls
GIRL	Geruchsimmissionsrichtlinie
GPS	Global Positioning System (globales Positionsbestimmungssystem)
<b>H</b>	
Hg	Quecksilber
<b>I</b>	
i.d.R.	in der Regel
IED	Industrial Emission Directive (Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU)
IED-Durchführungsbeschluss	Durchführungsbeschluss der Kommission vom 10. Februar 2012 mit Leitlinien für die Erhebung von Daten sowie für die Ausarbeitung der BVT-Merkblätter und die entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
IRW	Inspektion, Reparatur und Wartung
IVU-Richtlinie	EG-Richtlinie zur Integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (Integrated Pollution Prevention and Control, kurz: „IPPC“)
<b>K</b>	
Kap. (§)	Kapitel

KrWG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz)
<b>L</b>	
LAGA	Bund-/Ländergemeinschaft Abfall
LBB	Lagerbestandsbewertung
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
<b>M</b>	
MBA	Mechanisch-biologische Aufbereitung
Mn	Mangan
MV	Müllverbrennung
<b>N</b>	
NachwV	Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung)
NE	Nichteisen
Ni	Nickel
Nr. (§)	Nummer
<b>O</b>	
o.ä.	oder ähnlich
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
<b>P</b>	
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PBDD/F	Polybromierten Dibenz(o,p)dioxine- und furane
PBDE	Polybromierten Diphenylether
PC	Personal Computer
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxide und Dibenzofurane
PCB	Polychlorierte Biphenyle
Pd	Palladium
PLT	Prozessleittechnik

---

POP	Persistent Organic Pollutant (persistent organischer Schadstoff)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PU	Polyurethan
<b>R</b>	
ROI	Return on Investment (Kapitalrentabilität)
ROV	Restozonvernichter
PST	Post-Schredder-Technologie
RTO	Regenerative Thermische Oxidation
R&I-Fließbild	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild/-schema
<b>S</b>	
S. (§)	Satz
Sb	Antimon
SDA	Shredder-Drive-Assistent
Se	Selen
Si	Silizium
SLF	Schredderleichtfraktion
Sn	Zinn
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language (strukturierte Abfragesprache)
SSF	Schredderschwerfraktion
SSS	Smart-Shredding-System
SVM	Schreddervormaterial
<b>T</b>	
TA Lärm	Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm)
TA Luft	Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft)
Te	Tellur
Tl	Thallium
TOC	Total Organic Carbon (Gesamtkohlenstoff)
TVOC	Total Volatile Organic Carbon (flüchtiger Gesamtkohlenstoff)

TWG	Technical Working Groups (technische Arbeitsgruppe)
<b>U</b>	
u.a.	unter anderem
UMS	Umweltmanagementsystem
USD	US-Dollar
u.U.	unter Umständen
<b>V</b>	
V	Vanadium
VDI (§)	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
VdS	VdS Schadenverhütung GmbH
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
VVA	Europäische Abfallverbringungsverordnung Nr. 1013/2006
<b>W</b>	
WEEE	Waste Electrical and Electronical Equipment Directive (Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik- Altgeräte)
<b>Z</b>	
z.B.	zum Beispiel
Zn	Zink

## Symbol- und Einheitenverzeichnis

A	Ampere (Stromstärke)
bar	Bar (Druck)
°C	Grad Celsius (Temperatur)
cm	Zentimeter (Längenmaß)
cm/s	Sinkgeschwindigkeit
cps	counts per second (Impulsrate)
d	Tag (Zeiteinheit)
$\Delta$	Delta (Durchschnitt, Halbstundenmittelwert)
€	Euro (Währung)
€/kWh	Stromkosten
$\mu$	Durchsatz (Masse)
g	Gramm (Masse)
Gew.-%	Massenanteil/Gewichtsprozent
h	Stunde (Zeiteinheit)
h/d	Sollstunden
Hz	Herz (Frequenz)
kg	Kilogramm (Masse)
kg/h	Massenstrom
kg/m <sup>2</sup>	Flächenmasse
kg/m <sup>3</sup>	Dichte
kg/t	Massenanteil
kN	Kilonewton (Kraft)
kW	Kilowatt (Leistung)
kWh	Stromverbrauch
l	Liter (Volumen)
l/min	Volumenstrom Flüssigkeit pro Minute
m	Meter (Längenmaß)
$\mu$ g	Mikrogramm (Masse)
$\mu$ g/l	Massenkonzentration
$\mu$ g/(m <sup>2</sup> *d)	Staubniederschlag
mg	Milligramm (Masse)
mg/l	Massenkonzentration
mg/Nm <sup>3</sup>	Massenkonzentration (Normkubikmeter)
MJ/kg	Heizwert
m <sup>2</sup>	Quadratmeter (Fläche)

$m^3$	Kubikmeter (Volumen)
$m^3/h$	Volumenstrom (Abgas pro Stunde)
$\mu m$	Mikrometer (Partikeldurchmesser)
mm	Millimeter (Längenmaß)
m/s	Geschwindigkeit
mS	Millisiemens (elektrischer Leitwert)
Mt	Megatonne (Masse)
$ng/Nm^3$	Massenkonzentration
pg	Pikogramm (Masse)
$pg/(m^2 \cdot d)$	Staubniederschlag
ppm	parts per million (Massenprozent)
$\Sigma$	Summe
t	Tonnage (Masse), Menge
t/h	Durchsatz
$t/m^3$	Schüttdichte
U/min	Drehzahl
V	Volt (Spannung)
$Wh/m^3$	Energieeintrag UV-Strahlung
§	Paragraph
%	Prozent



## Formelverzeichnis

Nr.	Symbol	Bedeutung	Formel	Einheit
(1)	$K_{MS}$	Maschinen- stundensatz	$K_{MS} = \frac{K_{Afa} + K_Z + K_R + K_E + K_{IRW}}{t_L}$	[€/h]
(2)	$K_{var,An}$	variable Kosten Anlagentechnik	$K_{var,An} = \frac{K_E + K_{IRW}}{t_{Pr}}$	[€/h]
(3)	$K_{fix,An}$	fixe Kosten Anlagentechnik	$K_{fix,An} = \frac{K_{Afa} + K_Z + K_{Sonst}}{d}$	[€/d]
(4)	$a_{Um}$	Umschlagsfaktor	$a_{Um} = \frac{t_{Um}}{t_{Pr}} * \gamma_{Sch}$	[-]
(5)	$K_{var,Um}$	variable Kosten Umschlaggerät	$K_{var,Um} = \frac{K_E + K_{IRW}}{t_{Um}} * \gamma_{Sch}$	[€/h]
(6)	$K_{var,Pr/Um}$	variable Kosten Umschlaggerät pro Produktionsstunde	$K_{var,Pr/Um} = K_{var,Um} * a_{Um}$	[€/h]
(7)	$K_{fix,Pers}$	fixe Kosten Personal	$K_{fix,Pers} = \frac{K_{Lo} + K_{Sonst}}{d} * \gamma_{Sch}$	[€/d]
(8)	$K_{var,Pers}$	variable Kosten (Fremd-)Personal	$K_{var,Pers} = K_{Fremd} * t_{Arb} * \gamma_{Sch}$	[€/h]
(9)	$K_{fix,Infra}$	fixe Kosten Infrastruktur	$K_{fix,Infra} = \frac{K_M + K_{IRW} + K_{Betr} + K_{Sonst}}{d} * \gamma_{Sch}$	[€/d]
(10)	$K_{fix,Han}$	fixe Kosten Handelsbeteiligung	$K_{fix,Han} = \frac{K_{Han}}{d} * \gamma_{Sch}$	[€/d]
(11)	$K_{var,Ges}$	variable Gesamtkosten Schredderprozess	$K_{var,Ges} = K_{var,Anl} + \sum K_{var,Pr/Um} + \sum K_{var,Pers}$	[€/h]
(12)	$K_{fix,Ges}$	fixe Kosten Schredderprozess	$K_{fix,Ges} = K_{fix,Anl} + K_{fix,Pr/Um} + K_{fix,Pers} + K_{fix,Infra} + K_{fix,Han}$	[€/d]
(13)	$\bar{w}_x$	standardisierter, anteiliger Stromverbrauch der Produktionseinheit	$\bar{w}_x = \frac{W_x}{W_{Mühle}} * 100$	[%]
(14)	$\beta$	Verbrauchsfaktor Strom	$\beta = \frac{W_{Mühle}}{P_{Mühle}}$	[kWh/kW]

(15)	$\bar{W}_x$	standardisierter Stromverbrauch der Produktionseinheit in Abhängigkeit der installierten Schredderleistung	$\bar{W}_x = \frac{P_{M\ddot{u}hle} * \bar{W}_x * \beta}{P_{M\ddot{u}hle}}$	[kWh/kW]
(16)	$\bar{K}_E$	standardisierte Energiekosten in Abhängigkeit zur installierten Schredderleistung	$\bar{K}_E = \sum \bar{W}_x * K_{Str}$	[kWh/kW]
(17)	$\bar{K}_{var,Um/Pr}$	standardisierte variable Kosten des Umschlaggerätes in Abhängigkeit der Produktionsmengen	$\bar{K}_{var,Um/Pr} = \frac{\bar{K}_{var,Um} * \sum a_{Um}}{\mu}$	[€/t]
(18)	$\bar{K}_{fix,Um}$	standardisierte fixe Kosten pro Umschlaggerät und Produktionstag	$\bar{K}_{fix,Um} = \sum \frac{K_{Afa} + K_Z + K_{Sonst}}{d_{Pr}}$	[€/t]
(19)	$\bar{K}_{fix,Infr}$	standardisierte fixe Kosten der Infrastruktur in Abhängigkeit zur Fläche und dem Produktionstag	$\bar{K}_{fix,Infr} = \frac{K_{fix,Infr}}{A_{Sch}}$	[€/m <sup>2</sup> *d]
(20)	$\bar{K}_{var,Han}$	standardisierte variable Kosten der Handelsbeteiligung in Abhängigkeit zur Produktionsmenge	$\bar{K}_{var,Han} = \frac{K_{fix,Han}}{\mu}$	[€/t]
(21)	$K_{€/h Pr}$	Produktionskosten in Abhängigkeit zur Produktionsdauer	$K_{€/h Pr} = \frac{t_{Pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}}{t_{Pr}}$	[€/h]
(22)	$K_{€/h Betr}$	Produktionskosten in Abhängigkeit zur Betriebszeit	$K_{€/h Betr} = \frac{t_{Pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}}{t_{Betr}}$	[€/h]

(23)	$K_{\text{€}/t}$	Produktionskosten in Abhängigkeit zur Produktionsmenge	$K_{\text{€}/t} = \frac{t_{pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}}{m_{pr}}$	[€/t]
(24)	$M_{\text{€}/t}$	Marge in Abhängigkeit zur Produktionsmenge	$M_{\text{€}/t} = \frac{L_{Out} - (K_{In} + (t_{pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}))}{m_{pr}}$	[€/t]
(25)	$\tau$	Verfügbarkeitsfaktor	$\tau = \frac{t_{pr}}{t_{sch}} * 100$	[%]
(26)	$\delta$	Leistungsfaktor	$\delta = \frac{\mu}{\mu_{max}} * 100$	[%]
(27)	$OEE$	Overall Equipment Effectiveness/ Gesamtanlagen- effektivität	$OEE = \tau * \delta$	[%]



# 1 Einleitung

Die weltweite Rohstahlerzeugung belief sich im Jahre 2018 auf 1.808 Millionen t [1]. Der Einsatz von Stahlschrotten zur ressourcenschonenden Rohstahlerzeugung, lag in der Periode 2011 bis 2017 zwischen 35 und 37 % [2] [3] [4]. In Deutschland wurden in 2018 42,4 Millionen t Rohstahl erzeugt. Die Bundesrepublik steht damit an siebter Stelle der Stahlproduzenten in der Welt. Durch aktives Stahlrecycling werden hier zu Lande jährlich bis zu 20 Millionen t Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) eingespart. Das entspricht einem Stahlschrotteinsatz von ca. 45 % [4] [5].

Großschredderanlagen gehören mit einer Versorgungsquote von 20 bis 25 % zu den wesentlichen Elektrostahlwerkslieferanten und bilden einen Kernbereich der deutschen Recyclingwirtschaft für Eisen(Fe)- und Metallschrotte. Europäische Rechtsvorschriften prägen die Kreislaufwirtschaft und den daran gebundenen Umweltschutz in Deutschland, zunehmend auch in den Bereichen der Energieeffizienz, Ressourcenschonung und dem Klimaschutz [6] und wirken sich auf den Fortbestand von altgedienten Schredderanlagen aus. Überkapazitäten im Markt, die aktuelle Konjunkturschwäche der europäischen Wirtschaft und die wertstoffhaltigen Veränderungen im Vormaterial, setzen Schredderbetreiber in ihrer langfristigen strategischen Ausrichtung zusätzlich unter Druck.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen neuer umweltschutzrechtlicher Forderungen in der Luftreinhaltung auf den Betrieb und die technische Weiterentwicklung von Autoschreddern zur Fe-, Konsumgüter- und Metallschrottverarbeitung in Deutschland. Sie ist im Rahmen dieser ökologischen Entwicklungstendenzen bei der TSR Recycling GmbH & Co. KG (TSR) im Zeitraum 2016 bis 2019 zur Erforschung und Evaluation ökonomischer und innovativer Systemlösungen in der Schreddertechnik durchgeführt worden, welche die Basis der gegenwärtigen Dissertation bilden.

Die eigentliche Forschungsarbeit gründet auf der Zusammenführung von sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen in einem methodischen Systemkonzept. Das Systemkonzept gibt den strukturellen Aufbau dieser Arbeit vor und fußt auf einer interdisziplinären Herangehensweise.

Vor der eigentlichen Systembeschreibung stand die Ermittlung aller relevanten Grundlagen, die sowohl formalrechtliche, technische als auch wirtschaftliche Aspekte des wertstromorientierten Schredderprozesses umfassen.

In Kapitel 2 werden die umweltschutzrechtlichen Rahmenbedingungen für die Anzeige, den Betrieb und die Stilllegung von Schredderanlagen beschrieben. Die wesentlichen Ausführungen zum Stand der Technik finden sich in Kapitel 3, wo die produktionstechnische, der abfallrechtlichen Systematik vorangestellt wird. Der Grundlagenteil dieser Arbeit wird mittels der betriebswirtschaftlichen Strukturen an Schredderanlagen in Kapitel 4 vollendet.

In Folge der Einführungskapitel wird das methodische Vorgehen im genannten Systemkonzept beschrieben. Die in Kapitel 5 dargestellte Methodik ist der Ausgangspunkt für die nachgelagerte Ermittlung und Entwicklung rechtlicher und technischer Rahmenbedingungen für den Großschredder im Schrottreycling der „Digitalen Zukunft“.

In Kapitel 6 werden die wesentlichen Änderungen in der europäischen und nationalen Gesetzgebung zur Emissionsminderung analysiert und für die mechanische Abfallbehandlung an Schreddern zusammengeführt. Kapitel 7 stellt ergänzend dazu den neuen gesetzlichen Rahmen in einen Kontext mit empirischen Abluftmessungen an Schreddern und liefert eine Basis für Bewertung des stoffstromgetriebenen Emissionsverhaltens an diesen Anlagen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich emissionstechnische Maßnahmen und Systemgrenzen in der Schredderbestandstechnik ableiten und in einem Leistungsverzeichnis zusammenfassen. Kapitel 8 fokussiert sich in diesem Zusammenhang auf die Rolle der technischen und kaufmännischen Evaluation des Bestandsprozesses und liefert einen kennzahlenstrategischen Ansatz zur Bewertung der Risikofrage in der Anlagenneuplanung.

Gegenstand des Hauptkapitels 9 ist die Darstellung einer Konzeptstudie über die planerische Umsetzung einer Schredderanlage unter den in Kapitel 8 herausgearbeiteten Randbedingungen. Das Kapitel stellt den technischen Forschungsbeitrag der Dissertationsschrift, in den Fachbereichen Abluftreinigung, Sortiertechnik und Prozessdigitalisierung dar und schließt mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gelieferten Systemlösungen ab. Die Bewertung genehmigungstechnischer Auswirkungen und Potentiale in Folge der Umsetzung der ausgearbeiteten Konzeptvarianten, wird in Kapitel 10 durchgeführt. In Anlehnung an die vorgeschaltete Erfolgsrechnung, bildet sie den Abschluss des Risikomanagements im Entscheidungsprozess um eine Anlageninvestition.

Die Ausarbeitung schließt mit einer empirischen Stoffstromanalyse und der Untersuchung wertstofflicher Entwicklungstendenzen im Materialein- und -ausgang am Schredder (Kapitel 11). Diese bilden gemeinsam den letzten Kerneinflussfaktor auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen und stehen für

den eigentlichen Antreiber der „Advanced Circular Economy“ im ausgearbeiteten systemischen Kreislaufmodell. Die wesentlichen Erkenntnisse werden abschließend in Kapitel 12 als Fazit zusammengefasst.

Die Dissertationsschrift ist inhaltlich so abgestimmt, dass trotz der geschlossenen Argumentationskette im Systemkonzept, jedes Kapitel für sich alleinstehend gelesen und verwendet werden kann. Alle gelieferten Mess- und Analysedaten wurden, wenn nicht anderweitig gekennzeichnet, bei der TSR aufgenommen. Zur Verbesserung des Leseflusses wird auf die Kennzeichnung interner TSR-Quellen verzichtet. Bilder und Tabellen ohne anderweitigen Vermerk, entstammen der eigenen Darstellung.

Sprachlich orientiert sich diese Arbeit an einer produktionstechnischen und wirtschaftswissenschaftlichen Terminologie, etwaige sprachliche Überschneidungen zu abfallrechtlichen bzw. kreislaufwirtschaftlichen Sachverhalten werden, wo sinnvoll, im Text entsprechend klargestellt.

## 2 Rechtliche Rahmenbedingungen an Schredderanlagen

Das Kernziel dieses Einführungskapitels liegt in der Darstellung der allgemeinen umweltrechtlichen Rahmenbedingungen für die Anzeige, den Betrieb und die Stilllegung von Großschredderanlagen in Deutschland.

Im Fokus stehen dabei das europäische Best Available Technique Reference Document (BREF) für Abfallbehandlungsanlagen und das deutsche Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Verbindung mit der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).

Gemäß dem wissenschaftlichen Standard, finden sich die Quellverweise für relevante Gesetzestexte direkt im Fließtext der Arbeit. Auf eine separate Auflistung von Gesetzen, Richtlinien, Verordnungen, frei zugänglichen gesetzlichen Behördeninterpretationen o.ä., wird im Literaturverzeichnis folglich verzichtet.

Die aufgeführten Gesetzesverweise entsprechen immer der aktuellsten Fassung des Regelwerkes, wenn nicht anders gekennzeichnet.

In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass eine Novellierung den Vorgang der Gesetzesänderung beschreibt, der betrachtete Entwurf also streng genommen noch nicht offiziell verabschiedet ist. Die in dieser Dissertation untersuchten Verwaltungsvorschriften, befinden sich jedoch in einem so weit fortgeschrittenen Stadium der Vorbereitung (finaler Referentenentwürfe o.ä.), dass sie wie eine offizielle Novelle ihrer Stammfassung behandelt werden. Dasselbe gilt für die Verwendung europäischer Änderungsgesetze und konsolidierter Fassungen etc., wenn nicht anderweitig vermerkt.

### 2.1 Umweltrecht

Die rechtliche Grundlage zu den emissionstechnischen Einflüssen auf den Betrieb und die Weiterentwicklung von Schredderanlagen, bilden das europäische und nationale Umweltrecht. In Deutschland definiert sich das Umweltrecht über die Summe der Rechtsnormen, die dem Schutz der Umwelt dienen. Damit ist das Umweltrecht kein scharf abgrenzbares Rechtsgebiet. Entgegen der Betrachtungsweise, die Umwelt im weitesten Sinne als Gesamtheit der äußeren Lebensbedingungen, die auf eine bestimmte Lebensinheit einwirken zu verstehen, orientiert sich das Umweltrecht am modifiziert restriktiven Umweltbegriff. Hierzu zählen als natürliche Umwelt nur die elementaren Lebensgrundlagen des Menschen, welche in Form der Umweltmedien Boden, Luft, Wasser, Flora und Fauna, ökologischen Ressourcen, des Klimas und ihren Beziehungen untereinander sowie auf Basis der gegenwärtig gewachsenen Kulturlandschaft, erfasst sind [7].



Der Umweltschutz stellt sich in diesem Zusammenhang als eine problemorientierte Querschnittsaufgabe dar, die darauf ausgerichtet ist, eingetretene Umweltschäden zu beseitigen, gegenwärtige Umweltbelastungen zu begrenzen, zu vermindern und zukünftigen Beschwerden vorzubeugen. Der mediale, sprich umweltmedienübergreifende und der integrative Umweltschutz, der als schutzzielergänzender oder konkurrierende Regelungsansatz in die Rechtsebene Einzug findet, bilden den Fokus der hier diskutierten Normen. Die Handlungsebenen des Umweltschutzes finden sich dabei primär in der Umweltpolitik, der Umweltökonomie und dem genannten Umweltrecht [7].

Das Umweltrecht gilt als wichtigstes Instrument zur Durchsetzung der Umweltpolitik und lässt sich entsprechend der drei herkömmlichen Rechtsdisziplinen in Umweltstraf-, -privat-, und das öffentliche Umweltverwaltungsrecht untergliedern. Es ist von drei Grundprinzipien geprägt: dem Vorsorge-, Verursacher- und Kooperationsprinzip [7].

Das Vorsorgeprinzip beschreibt den planenden, präventiven Umweltschutz bereits in der Entstehungsphase von Umweltgefahren und Schäden. Die beiden Dimensionen des Vorsorgeprinzips sind Risikovorsorge als eine Sicherheitsreserve zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlage und die Ressourcenvorsorge, welche dem Konzept für umweltverträgliches Wirtschaftswachstum folgt und so zum Apparat des Nachhaltigkeitsgedankens wird [7]. Das Vorsorgeprinzip ist Leitlinie der Umweltpolitik auf der deutschen, der europäischen und der internationalen Ebene.

Die Verantwortlichkeit für Umweltbeeinträchtigungen wird über das Verursacherprinzip abgebildet. Als ordnungsrechtliches Instrument fordert es, dass derjenige für die Beseitigung, Verminderung, Vermeidung oder einen umweltrelevanten Ausgleich herangezogen werden soll, der als Verursacher einsteht. Es beschreibt sowohl die materielle Verantwortlichkeit des Verursachers im weitesten Sinne, als auch die aus einer Ausgleichsmaßnahme resultierende Kostenzurechnung. Im Anwendungsfall bedarf es einer näheren gesetzgeberischen Konkretisierung, die gemäß dem instrumentalistischen Verständnis, die Zurechnung der Umweltbelastungen in dem Umfang erfolgen lässt, in dem sie umweltpolitisch Festlegung durch den Gesetzgeber findet.

Dem Kooperationsprinzip zufolge ist die Zusammenarbeit der staatlichen und gesellschaftlichen Kräfte in umweltrelevanten Entscheidungsprozessen notwendig, um die Wirksamkeit umweltpolitischer Entscheidungen zu verbessern. Das gemeinsame Wirken des Staates mit Umweltorganisationen, Industrie und Handel, die Förderung von Wissenschaft und Technik in Umweltschutzfragen auf Bundes- und Länderebene, sowie staatsübergreifende Kooperationen, sind Ausdruck dieser geforderten Zusammenarbeit auf nationaler und internationaler Ebene und zeigen die Reichweite des dritten Grundprinzips auf [7].

Rechtsverbindlichkeit kommt den genannten Hauptprinzipien bei entsprechender gesetzlicher Fixierung zu [7]. Die Normierung des Kooperationsprinzips findet sich bspw. im Immissionsschutz- und Abfallrecht. Der Schutzzweck des jeweiligen Gesetzes, bestimmt dann die Reichweite der einzelnen Prinzipien.

Umwelttechnisch verbindliche Vorgaben ergeben sich ferner aus dem Europa- bzw. Unionsrecht. Die von den Mitgliedsstaaten in Gründungs-, Revisions- und Beitrittsverträgen niedergelegten Rechtsnormen bilden das primäre Unionsrecht. Das sekundäre Unionsrecht umfasst alle Rechtsakte, die von den Organen der Europäischen Union (EU) in Form von Richtlinien, Verordnungen, Beschlüssen, Empfehlungen und Stellungnahmen gemäß Art. 288 des Vertrages über die Arbeitsweise der EU (AEUV) erlassen werden. Sie sind die zulässigen Handlungsformen, die der Union zur Wahrnehmung ihrer Kompetenzen zur Verfügung stehen und binden auf Grund der hiermit einhergehenden Umsetzungspflicht der Mitgliedsstaaten, das nationale Recht [7]. Durch die Verbindung aus umweltpolitischen Zielen und den Grundsätzen zur Gestaltung der Umweltpolitik in der EU (Art. 191 Abs. 1 AEUV), besteht heute ein verbindliches Umweltrecht in Europa [7]. Dieses europäische Recht ist dem nationalen Recht im Falle einer Kollision anwendungsvorrangig und bildet bei der Weiterentwicklung von Schredderanlagen, den rechtlichen Kern dieser Arbeit.

## **2.2 Europäisches Umweltrecht**

Großindustrieanlagen wie Autoschredder zur Fe- und Metallschrottverarbeitung, werden als Ableger der Abfallbehandlungsanlagen in Europa unter der am 6. Januar 2011 in Kraft getretenen EU-Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (englisch: Industrial Emission Directive, IED) geführt [8]. Die IED hat u.a. die bis Ende 2010 für das Anlagenzulassungsrecht gültige IVU-Richtlinie 2008/1/EG zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung der Europäischen Gemeinschaft ersetzt und wesentlich erweitert. Heute regelt die IED unter Einbindung des Verursacher- und Vorsorgeprinzips die Genehmigung, den Betrieb und die Stilllegung umweltrelevanter Industrieanlagen, einschließlich Anlagen der Energieerzeugung und der Abfallwirtschaft. Sie benennt die Auflagen und Pflichten der Anlagenbetreiber und legt entsprechende Überwachungsmodalitäten durch die zuständigen Behörden fest (siehe auch Kapitel 2.5) [9].

Das medienübergreifende Integrationskonzept der Richtlinie (Satz 3 2010/75/EU) zielt auf ein einheitlich hohes Schutzniveau für die Umwelt ab und ist darauf ausgerichtet den Wirk-

bereich der ca. 50.000 gelisteten IED-Anlagen in der EU, unter emissionstechnischen Aspekten zu erfassen und zu regulieren. Der integrative Ansatz bezweckt danach nicht nur den segregierten Schutz der einzelnen Medien Luft, Wasser und Boden, sondern nimmt die Belastung der Umwelt in ihrer Gesamtheit in den Blick. Lösungen zur Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Unfallvermeidung, werden ebenso berücksichtigt, wie abfallwirtschaftliche Belange. Der daraus resultierende einheitliche Umweltbilanzierungsrahmen reduziert die Wettbewerbsverzerrung unter den Anlagenbetreibern und fördert Ansätze zu einer nachhaltigen Auslegung der Produktionsstandorte in Europa [10].

Der Vollständigkeit und dem Fokus dieser Arbeit entsprechend sei an dieser Stelle ergänzt, dass das EU-Luftreinhaltegesetz zwischen quellenbezogenen und quellenunabhängigen Regelungen differenziert. Die Luftqualitätsrahmenrichtlinie 2008/50/EG über die Luftqualität und saubere Luft für Europa, dient der Definition und Festlegung von Luftqualitätszielen über Grenz- und Leitwerte sowie von zu ergreifenden Maßnahmen. Sie ist demnach quellenunabhängig. Der überwiegende Anteil an immissionsschutzrelevanten Regelungen zur Vermeidung und Verminderung von Luftverschmutzungen ist jedoch quellenabhängig [7]. Die formulierten Leitlinien wirken als Pflichtenregelung in der EU und müssen in nationales Recht umgesetzt werden. Sie diktieren sowohl die vollständige Koordination der beteiligten Behörden im Genehmigungsthemen unter Vorgabe des produktionsintegrierten Umweltschutzes, als auch die unter Anhang I geführten industriellen Tätigkeiten und Aufgaben der IED-Anlagenbetreiber gemäß ihrer Kapazitätsschwelle [11]. Eine ausführliche Beschreibung dieser Verpflichtungen finden sich im laufenden Text unter den Kapiteln 2.4 und 2.5. Großschredderanlagen werden in der IED unter Nr. 5.3.b.iv Anh. I 2010/75/EU für die Behandlung von nichtgefährlichen Abfällen mit einer Kapazität von mehr als 75 t pro Tag aufgeführt (siehe auch Kapitel 6.2).

### **2.2.1 BREF für Abfallbehandlungsanlagen**

Die Umsetzung und Einhaltung der genannten Leitlinien erfolgt über das BREF. Die inhaltliche Ausarbeitung dieser Merkblätter und entsprechender Qualitätssicherungsmaßnahmen erfolgt gemäß Artt. 13 Abs. 3.c f. 2010/75/EU im Durchführungsbeschluss der EU-Kommission (IED-Durchführungsbeschluss). Best verfügbare Techniken (BVT) sind nach Art. 3 Abs. 10 2010/75/EU Maßnahmen, die bei integrierter Betrachtung aller Umweltmedien für die branchenspezifischen Betriebsmethoden den höchsten Umweltschutz gewährleisten und unter ökonomischen Aspekten als ausgereift und zumutbar erachtet werden [9]. Sie sind Ausdruck des effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstandes

von Technologien, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt eingesetzt werden.

Die BVT-Schlussfolgerungen wiederum fassen die zentralen Elemente der BVT sowie die damit assoziierten zeitgerechten Emissions- und Verbrauchswerte rechtsverbindlich zusammen. Sie dienen europaweit als Referenzdokument für die Festlegung der Genehmigungsaufgaben von besonders umweltrelevanten Industrieanlagen und sind bei Normalbetrieb der Anlage konsequent anzuwenden [9].

In der weiteren Verwendung des Begriffes „BREF“ im Kontext dieser Arbeit, wird ausschließlich Bezug auf das BREF für Abfallbehandlungsanlagen genommen, wenn nicht anders im Text gekennzeichnet.

### **2.2.2 BVT-Merkblätter**

Die BVT-Merkblätter (Art. 3 Abs. 11 2010/75/EU) folgen strukturell und unabhängig ihrer spezifischen Anwendungsbereiche einem einheitlichen Aufbau, welcher gemäß dem IED-Durchführungsbeschluss in sieben Kernkapitel unterteilt wird.

Ein Vorwort beschreibt die Struktur als auch den rechtlichen Rahmen des Merkblattes. Die für den Anwendungsfall relevanten Anlagen des Anhang I der IED werden hier gesondert benannt und folglich den im Geltungsbereich des Dokuments aufgeführten Tätigkeiten zugeordnet. Der zweite Abschnitt, der durch das Kapitel 1 abgebildet wird, enthält eine Branchenübersicht. Diese gibt einen kurzen Überblick über die Größe und Struktur des Industriezweigs, die vorherrschenden Produktionskapazitäten und enthält Aussagen zu den ökonomischen Randbedingungen. Die genannte Übersicht stellt relevante Umweltfragen und setzt sie in Zusammenhang mit sektorspezifischen Emissions- und Verbrauchsdaten. Im darauffolgenden Kapitel 2 werden die üblichen Produktionsprozesse der Branche verfahrenstechnisch erläutert. Für Abfallbehandlungsanlagen beinhaltet der Abschnitt neben den Angaben zur Verwendung von Sekundär- und Recyclingrohstoffen auch Nachbehandlungs- und Verwertungsoptionen für Abfälle aus dem Produktionsprozess. Die Berichterstattung über anlagenrelevante Emissionen, Verbräuche aus Energie, Wasser und Rohstoffen, Leistungsdaten und Betriebsbedingungen, wird von dem vorgelagerten Abschnitt entkoppelt, in einem eigenen Kapitel 3 dargestellt. Standarddaten aus nationalen und internationalen Regelwerken werden für einen Betriebsdatenvergleich und zur Überprüfung der Umweltverträglichkeit der industriellen Teilprozesse herangezogen und schließen die branchenspezifische Grundlagenanalyse des Merkblatts ab [11].

Im vierten Abschnitt werden schließlich solche Techniken und Verfahrensschritte explizit und leistungsbezogen beschrieben, die entweder als integrative Prozesslösungen oder

nachgeschaltete Behandlungssysteme für eine Emissionsminderung als BVT in Betracht kommen. Der Umweltnutzen, die medienübergreifenden und wirtschaftlichen Auswirkungen werden als wesentliche Kriterien einer BVT ebenfalls untersucht.

### **2.2.3 BVT-Schlussfolgerungen**

Die BVT-Schlussfolgerungen (Art. 3 Abs. 12 2010/75/EU) werden als gesonderter Abschnitt im Merkblatt geführt (Kapitel 5) und entsprechend der Ausführung im oberen Teil dieser Beschreibung, als separates Dokument in Form eines Durchführungsbeschlusses der EU-Kommission in allen Amtssprachen der EU veröffentlicht. Die Kerninformationen der Schlussfolgerung basierten auf den vorgeschalteten Inhalten des dritten Kapitels zur Beschreibung der geforderten Standardtechnologien. Im Fokus der Anlagenbetreiber stehen dabei die hier verankerten Emissionsbandbreiten, die als Leistungsstufen in Form von Emissions- und Verbrauchswerten oder der Wirksamkeit ihrer Emissionsminderung gekennzeichnet sind, sogenannte „Best Available Technique Associated Emission Levels“ (BAT-AEL). Die Schlussfolgerungen bestehen aus einer Reihe von Einzelschlussfolgerungen, wobei die dort enthaltene Liste von Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, weder normativ noch erschöpfend ist. Leistungsstufenunabhängige Schlussfolgerungen zeichnen sich darüber hinaus durch Umweltmanagementsysteme (UMS), Anforderungen an Überwachungsmaßnahmen oder Standortsanierungskonzepte aus.

Der vorletzte Abschnitt des BREF (i.d.R. Kapitel 6) benennt solche Techniken, die ein erhebliches Umweltentlastungspotential oder bei vergleichbaren Emissionen, ökonomische Vorteile aufweisen. Ihre Darstellung erfolgt auf Grund des frühen Forschungs- und Entwicklungsstadiums in reduziertem Umfang [11]. Einen fachlichen Abschluss findet das Merkblatt in Form abschließender Bemerkungen und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten an dem betrachteten Dokument. Er beinhaltet Beschreibungen zum zukünftigen Revisionsbedarf, den offenen Datenerhebungen und zu den laufenden Forschungsarbeiten in Hinblick auf die nächste Überprüfung des Dokuments. Der Abschnitt ist folglich ein Indikator für das stetige Bestreben der EU-Kommission die Merkblätter gemäß der Fortentwicklung des Standes der Technik zu aktualisieren und regelmäßig anzupassen. Über die Nennung der wesentlichen Informationsgeber wird deutlich, dass es sich bei der Erstellung des Merkblattes um keine Einzelleistung, sondern ein Sammelwerk aus mehreren Einrichtungen, Organisationen und Informationsquellen handelt.

Die Erstellung, Überprüfung und Aktualisierung der BVT-Merkblätter und ihre Schlussfolgerungen erfolgt über ein von der EU-Kommission organisiertes mehrjähriges Arbeitsprogramm. Das Programm wird in Form eines sektorübergreifenden dynamischen Informationsaustausches (Art. 13 Abs. 1.2.4 2010/75/EU) durch die Experten der EU-Umweltverwaltung, das IPPC-Büro in Sevilla, zwischen den einzelnen Mitgliedstaaten, den Umweltverbänden, den Nichtregierungsorganisationen und den Industrievertretern der EU-Länder in Form von technischen Arbeitsgruppen (englisch: Technical Working Groups, TWG) geführt (Komitologieverfahren) [9]. Die IED legt den Revisionszyklus der Merkblätter im Zuge des genannten „Sevilla-Prozesses“ auf acht Jahre fest.

## **2.3 Nationales Umweltrecht (Bundesrecht)**

Die Umsetzungsfrist der übergeordneten europäischen Anforderungen in nationales Recht, obliegt den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten selbst, ist aber auf einen Zeitraum von vier Jahren nach ihren Veröffentlichungen beschränkt (Art. 21 Abs. 3 2010/75/EU). Aus dieser Fristsetzung heraus, haben die auf EU-Ebene beschlossenen Regelungen direkte Auswirkungen auf die Umweltstandards für deutsche Industrieanlagen und die daran gebundenen Behörden- und Betreiberpflichten, wie bspw. die verstärkte Überwachung von Genehmigungsaufgaben [9].

### **2.3.1 BImSchG**

Neben dem Sekundärrecht der EU finden sich die wichtigsten Rechtsgrundlagen zur Luftreinhaltung im deutschen Bundesrecht, auch wenn auf Grund des weiträumig grenzübergreifenden Charakters von Luftverunreinigungen, diese zunehmend in internationalen Zusatzvereinbarungen geregelt werden. Die Umsetzung der IED erfolgt in Deutschland schlussendlich im BImSchG bzw. seinen nachgeschalteten Verordnungen. Die BVT-Schlussfolgerungen werden unter § 3 Abs. 6.b BImSchG gesondert erfasst.

Das BImSchG bestimmt in Deutschland den anlagen-, produkt-, verkehrs- und gebietsbezogenen Immissionsschutz. Das immanente Hauptziel des Immissionsschutzrechts ist der Schutz vor Luftverunreinigungen und Lärm (siehe Kapitel 2.7). Es umfasst, durch die Vorgaben zum Anlagenrecht, darüber hinaus auch Maßnahmen zur immissionsunabhängigen Stör- und Unfallbegrenzung und bildet folglich einen Teil des technischen Sicherheitsrechts. Im Bereich der genehmigungsbedürftigen Anlagen zielt es auf Energieeinsparung, Abfallverwertung und -vermeidung ab und lehnt an das eingangs formulierte anthropozentrische

Umweltschutzkonzept an [7]. Das BImSchG definiert über seine nachgeschalteten Verordnungen, welche Anlagen genehmigungsbedürftig sind und regelt im Wesentlichen das Anlagenzulassungsrecht im Zusammenspiel mit der Verordnung zur Durchführung des BImSchG (BImSchV). Die namentliche Ernennung von Großschredderanlagen mit einer Behandlungs- bzw. Durchsatzkapazität von 50 t oder mehr am Tag, erfolgt unter der Nr. 8.9.1.1. Anh. I 4. BImSchV.

### **2.3.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)**

National sind Schredder zur Fe- und Metallschrottverarbeitung neben dem BImSchG, rechtlich an das KrWG gebunden. Das KrWG ist die Umsetzung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (EU-Richtlinie 2008/98/EG) in nationales Recht und regelt die Grundpflichten der Erzeuger und Besitzer von Abfällen (§§ 7 und 15 KrWG). Ziel des Gesetzes ist die nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie die Ressourceneffizienz durch die Einführung der fünfstufigen Abfallhierarchie, mit der die Vermeidung und das Recycling von Abfällen bestärkt wird. Demnach wird der Grundkanon der Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen, um die Differenzierung der Abfallverwertung in die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige Verwertung, erweitert (§ 6 KrWG) [7] [12]. Im KrWG teilweise verankert oder diesem nebenstehend und für Großschredderanlagen relevant, sind u.a. die Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe (EfbV), die Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) und das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG).

Schredderanlage werden als Teil eines Entsorgungsbetriebes zur Behandlung von Abfällen genehmigt und betrieben und unterliegen im Falle der freiwilligen Zertifizierung der EfbV. Im KrWG werden die Aufgaben und Anforderungen an einen Entsorgungsfachbetrieb über den Zertifizierungsprozess gemäß §§ 56 f. KrWG definiert [13]. In Deutschland sind nahezu alle Schredderstandorte Entsorgungsfachbetriebe.

Die AVV dient der Bezeichnung von Abfällen und der Einstufung dieser nach ihrer Gefährlichkeit (§ 1 AVV). Durch die Aufbereitung von Schrotten im Schredder findet eine abfallrechtliche Aufschlüsselung der erzeugten Produkte statt (siehe auch Kapitel 3.3). Als Erweiterung der europäischen Abfallverbringungsverordnung Nr. 1013/2006 (VVA) und dem KrWG nebenstehend, regelt das Abfallverbringungsgesetz in § 1 AbfVerbrG die grenzüberschreitende Verbringung der u.a. im Schredder produzierten Abfälle. Die VVA wiederum, setzt die Anforderungen der Basler Konvention zur Kontrolle der grenzüberschreitenden

Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung sowie die OECD-Ratsentscheidung zur Abfallverbringung um [14]. Die bundesweite Verbringung wird über das KrWG und die deutsche Nachweisverordnung (NachwV) geregelt.

### **2.3.3 ElektroG2**

Das 2015 novellierte und mit Übergangsregelungen im Jahre 2018 in Kraft getretene ElektroG2 setzte die europäische Waste Electrical and Electronical Equipment Directive (WEEE2) in nationales Recht um. Es regelt das Inverkehrbringen, die Rücknahme und Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten aus sechs Gerätekategorien (§ 2 Abs. 1 ElektroG). In Schredderanlagen ist die Behandlung der Weißen Ware, die der Sammelgruppe 4 (Großgeräte) zugeordnet wird, nur im Anschluss an eine Erstbehandlungsanlage genehmigt. Diese kann separat operiert oder in die Schredderanlage integriert sein, stellt aber immer einen eigenen Genehmigungstatbestand dar. Die Art der erforderlichen Vorbehandlung (Schadstoffentfrachtung, Entnahme weiterer Baukomponenten) ergibt sich aus der Anlage 4 ElektroG in Verbindung mit den LAGA-Vorschriften M 31A/B (umgestellt zum 01. Dezember 2018) und der VDI-Richtlinie 2343 Blatt 3. Eine Behandlung von Elektrokleingeräten in Schredderanlagen ist in Folge einer entsprechenden Genehmigung möglich. Seit der Umstellung der Sammelgruppen im ElektroG2, werden Elektro- und Elektronikaltgeräte der Sammelgruppe 4 auch dann zugeordnet, wenn mindestens eine ihrer äußeren Abmessungen mehr als 50 cm beträgt. In dieser Konstellation können Altgeräte desselben Gerätetyps entsprechend ihrer Dimensionierung unterschiedlichen Sammelgruppen zugeordnet werden und dadurch verschiedene Aufbereitungswege einschlagen. Demzufolge ist an Schredderanlagen zukünftig und neben den bekannten Haushaltsgroßgeräten sowie automatischen Ausgabegeräten, mit einem vermehrten Anteil an anderen Gerätetypen, wie bspw. Stereoanlagen oder Möbeln mit elektrischen Antrieben im Vormaterial zu rechnen. Die neue Zusammensetzung der Großgeräte führt zu einer Änderung des zu erwartenden Schadstoffspektrums, welche u.U. eine Anpassung der vorgeschalteten Sortier- bzw. Vorbehandlungsschritte am Schredder nach sich zieht; ein Umstand, der auch auf die sammelgruppenbezogenen Anlagengenehmigungen in Form von Gültigkeit und Aktualität, Einfluss nimmt.

Das ElektroG2 sieht eine Sammelquote der im Vorjahr in Verkehr gebrachten elektrischen und elektronischen Altgeräte für 2019 von 65 Gew-% vor [12].



### **2.3.4 Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV)**

Neben und in Ergänzung zum KrWG, aber für die Behandlung dieser komplexen Altprodukte im Schredder relevant, ist die deutsche AltfahrzeugV, die der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge dient. Neben der Produktverantwortung und Rücknahmepflichten der Hersteller und Importeure, regelt die Verordnung die Vorbehandlung und Trockenlegung von Altfahrzeugen und gibt zu erreichende Verwertungsquoten vor. Die geforderte Quote für die Wiederverwendung und Verwertung von Altkarosserien liegt bei größer 95 Gew.-% [12].

Die zuletzt genannten Gesetze und Verordnungen stehen nur indirekt im emissionsrechtlichen Fokus dieser Arbeit. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Form und Menge der behandelten Abfälle im Schredder, in direkter Korrelation mit den Emissionswerten der Anlage stehen. Die Bedeutung dieser Abhängigkeit, wird besonders in den Kapiteln 7 und 11 dieser Arbeit hervorgehoben, wenn es um die messtechnische Kontrolle und Evaluation der Emissionen an Schredderanlage sowie die Entwicklungstendenzen in den Abfallmengen geht.

## **2.4 Betreiberpflichten an IED-Anlagen**

Durch das Sammeln, Befördern, Behandeln und Lagern gefährlicher sowie nichtgefährlicher Abfälle, unterliegen Schredderbetriebe Anzeige-, Nachweis- und Überwachungspflichten [7], die sich neben der gesetzlichen Anordnung durch das KrWG, auch als (Neben-) Bestimmungen in dem Genehmigungsbescheid eines Betriebes wiederfinden können. Die Genehmigung einer Schredderanlage definiert die umweltrechtlichen Randbedingungen der Unternehmung u.a. in Form von Art und Menge der behandelten Stoffströme, sowie der daraus resultierenden Emissionsgrenzen. Soll eine nach § 4 BImSchG genehmigungsbedürftige Schredderanlage errichtet und betrieben werden, treten die nach § 5 BImSchG erlassenen immissionsschutzrechtlichen Betreiberpflichten in Kraft. Dieses Pflichtenheft fordert eine regelmäßige Selbstüberwachung der Unternehmen und statuiert Meldestrukturen gegenüber den Behörden. So sind Betreiber einer IED-Anlage verpflichtet, einen jährlichen Prüfbericht zur Einhaltung der spezifischen Genehmigungsvoraussetzungen vorzulegen, wenn diese Forderung im Genehmigungsbescheid hinterlegt ist oder wenn die Behörde diesen gemäß § 31 BImSchG für den Betrieb anordnet. Der Bericht stellt solche Daten und Ergebnisse zusammen, die als Prüfgrundlage einer emissionsrechtlichen Überwachung durch die Behörden dienen. Die Berichterstattung umfasst damit die in Art. 72 Abs.

2 2010/75/EU geforderten Informationen, zuzüglich eines Umsetzungsnachweises der erlassenen BVT-Schlussfolgerungen im Zuge einer Novellierung. Die Meldepflichten greifen unabhängig des genannten Turnus auch bei solchen Ereignissen, die den Genehmigungsanforderungen entgegenstehen oder in Form von schädlichen Umwelteinwirkungen stattgefunden haben [10].

Damit regelt der Ansatz die gesetzliche Meldepflicht auch in solchen Fällen, in denen eine wesentliche (§ 16 BImSchG) oder unwesentliche (§ 15 BImSchG) Änderung an einer IED-Anlage bevorsteht. Eine Änderung liegt im Rechtssinne dann vor, wenn der beabsichtigte Betrieb der Entsorgungsanlage von dem Genehmigten abweicht. Im Gegensatz zu einer anzeigenbedürftigen unwesentlichen Änderung im Sinne der Rechtslage, bedarf es einer Änderungsgenehmigung nach § 16 BImSchG, wenn die durch prozess- oder verfahrenstechnische Änderungen hervorgerufenen Umweltauswirkungen berechtigterweise, einen vertieften emissions- und/oder immissionsseitigen Prüfbedarf der Behörde auslösen [15]. Die emissionstechnisch erforderlichen Änderungen an Schredderanlagen sind unter Anwendung der hier diskutierten Regelwerke auf EU und nationaler Ebene, wesentlich. Wird für eine Anlagenneu- oder -änderungsplanung eine Genehmigung beantragt und stehen die in diesem Zusammenhang geplanten Anlagentätigkeiten im Umgang mit relevanten gefährlichen Stoffen, ist ein Ausgangszustandsbericht für Boden und Grundwasser gefordert (§ 10 BImSchG). Gegenstand des Berichts sind u.a. Informationen über die derzeitige und ggf. frühere Nutzung des Grundstücks, insbesondere Angaben zu relevanten gefährlichen Stoffen, deren Nachweis im Erdreich und/oder Grundwasser u.U. bis hin zu den Metaboliten von Abbauprodukten. Unter Einbindung der 9. BImSchV trifft die Berichterstattungspflicht auch auf solche Schredderanlagen zu, die nach dem 07. Januar 2014 eine Änderungsgenehmigung einreichen, ungeachtet dessen, ob sich die beantragte Änderung auf die Verwendung, die Erzeugung oder die Freisetzung relevanter gefährlicher Stoffe bezieht (§ 25 Abs. 2 9. BImSchV). Gekoppelt an den Ausgangszustandsbericht, ist die Rückführungspflicht des Betreibers. Sie beinhaltet die Forderung zur Rückführung des Anlagengrundstücks nach Betriebseinstellung in den dokumentierten Ausgangszustand und dient der Beseitigung von Boden- und Grundwasserverschmutzungen in Form von zumutbaren Sanierungsmaßnahmen.

## **2.5 Behördenpflichten für IED-Anlagen**

Die Überwachungsbefugnisse der Behörden richten sich primär nach § 52 BImSchG und ergänzen die genannten Mitteilungs- und Dokumentationspflichten des Anlagenbetreibers zu einem rechtlich übergeordneten Überwachungsinstrument. Überwachungspläne, darauf

gegründete Überwachungsprogramme und Umweltinspektionen, bilden den Rahmen des behördlichen Kontrollmechanismus. Der Umfang und die Häufigkeit einer anlagenspezifischen Überwachung, auch in Form von ein- bis dreijährlichen Vor-Ort-Besichtigungen bzw. Inspektionen, richten sich nach einer systematischen Beurteilung der anlagenrelevanten Umweltrisiken (Risikoeinstufung).

Die wesentlichen Feststellungen der Umweltinspektionen sind in Form einer Berichterstattung dokumentiert und geben Aufschluss über die Einhaltung der Genehmigungsanforderungen und eventueller Nebenbestimmungen nach § 12 BImSchG zur Emissionsbegrenzung. Sofern festgestellt wird, dass eine Anlage hinter den Anforderungen zurückbleibt, sind anlassbezogene Überwachungsmaßnahmen möglich [10]. Danach kann die zuständige Behörde Emissions- und Immissionsmessungen über die Art, Menge, räumliche und zeitliche Verteilung der Luftverunreinigungen sowie die daran gebundenen Austrittsbedingungen (Emissionsklärung) an den Anlagen fordern und entsprechende Schutzmaßnahmen ableiten (§§ 26 f. BImSchG). Die Behörde hat in solchen Entscheidungen dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz Rechnung zu tragen.

## **2.6 Normung und Messverfahren in der Luft**

Die im BREF und dem deutschen untergesetzlichen Regelwerk hinterlegten Emissionsgrenzen und Methoden zur sach- und fachgerecht messtechnischen Ermittlung sind an nationale, europäische und internationale Normen gebunden. Die Verwendung unterschiedlicher Messverfahren zur Ermittlung eines Messobjektes, kann die Vergleichbarkeit von Messergebnissen beeinflussen. Die Normierung von Mess- und Analyseverfahren ist essentiell, die Messergebnisse aus verschiedenen Schredderanlagen und Messinstituten (akkreditierte Messstellen) vergleichbar zu machen.

Die in Deutschland relevanten Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) zusammengefasst im VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft und die Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN), decken derzeit ein weites Spektrum von Messaufgaben und Messverfahren im Umweltschutz ab. In der EU erlassene Normen (EN) zur Luftbeschaffenheit werden in Deutschland als DIN EN-Normen veröffentlicht und sind den nationalen Normen vorzuziehen. Dieser Umstand lehnt an die beschriebene Hierarchiestruktur in der nationalen Gesetzgebung an. Normen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) haben in Deutschland nach ihrer Veröffentlichung keinen bindenden Charakter, können aber in einem vereinfachten Verfahren in DIN ISO-Normen überführt werden. Die im Rahmen von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Emissions- und Immissionsmessungen

an Schredderanlagen belangvollen VDI-Richtlinien, werden in den Kapiteln 6 und 7 dieser Arbeit näher betrachtet [16].

## 2.7 TA Luft

Die Umsetzung der Genehmigungsanforderungen kann unter Berücksichtigung der Merkblätter individuell für einen Standort als Einzelgenehmigung festgelegt werden, ohne dass dafür national verbindliche Vorgaben verfasst sind. In Deutschland hingegen erfolgt die Genehmigung von Anlagen gemäß Satz 6 2010/75/EU durch die Anpassung des untergesetzlichen Regelwerks über landesweit gültige rechtsverbindliche Vorschriften und Regelungen. Damit wird ein einheitliches Anforderungsniveau für die Genehmigung und den Betrieb von IED-Anlagen sichergestellt, wie der folgende Abschnitt zeigt [10].

Die zentrale Vorschrift zur Umsetzung der BVT-Merkblätter ist in Deutschland die TA Luft vom 24. Juli 2002. Sie ist eine auf der Basis von § 48 BImSchG erlassene zentrale Verwaltungsvorschrift zur Konkretisierung bzw. Präzisierung der Anforderungen der §§ 1, 3-6, 15-17, 26, 28 BImSchG und in dieser Fassung Grundlage der in Kapitel 6 untersuchten Novelle. Die TA Luft dient dadurch vorrangig der Verringerung von Emissionen und Immissionen von Luftschadstoffen aus den in der 4. BImSchV gelisteten genehmigungsbedürftigen Anlagen, wird aber auch zur Beurteilung von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen herangezogen.

Als Verwaltungsvorschrift ist die TA Luft in erster Linie für die Behörden von Bedeutung und enthält neben den Norminterpretierenden, auch normkonkretisierende Umweltstandards sowie Ermessensvorschriften [17]. Sie ist damit teilweise unmittelbar vollziehbar und bedarf keiner weiteren Auslegung [7]. Ihr Wirkungsbereich erstreckt sich über die meisten gewerblichen und industriellen Anlagen sowie Anlagen der Energiewirtschaft und Abfallentsorgung in Deutschland. Die TA Luft wird den Anforderungen zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen über den Grundsatz der integrierten Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen gerecht, indem sie medien- und schutzzielübergreifende Aspekte von vornherein berücksichtigt. Die emissionsbegrenzenden Maßnahmen der Vorschrift zielen vor der Verminderung vorrangig auf die Vermeidung dieser ab und ziehen demzufolge die prozess- bzw. produktionsintegrierten Ansätze, den nachgeschalteten Verfahren der Abgasreinigung vor. Über den Begriff der risikodifferenzierten Vorsorge wird der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz der emissionsbegrenzenden Maßnahmen besonders berücksichtigt. Die genannten Anforderungen fordern eine einheitliche und kontinuierliche Durchführung der Luftreinhaltemaßnahmen. Dieser Gleichbehandlungsgrundsatz legt im Rahmen der be-

hördlichen Anlagenüberwachung einheitliche Mess- und Beurteilungsverfahren fest. Anlagenspezifischen Besonderheiten wird durch Einzelregelungen Rechnung getragen. Die Altanlagenanierung ist hier als Standardkonzept geregelt, in welchem die Bestandsanlagen ggf. unter Anwendung von Übergangsfristen an den Stand der Technik herangeführt werden [17]. Durch die rechtliche Sekundärstellung, liegt die TA Luft im direkten Einflussbereich einer Novellierung der BVT-Merkblätter und wird im Zuge dessen regelmäßig überarbeitet, wie die Ergebnisse in Kapitel 6.3 dieser Dissertationsschrift zeigen.

In der aktuell noch gültigen TA Luft von 2002 sind keine speziellen Vorschriften für Schredderanlagen enthalten. Mit der nächsten Novellierung, deren Entwurf bereits vorliegt, werden entsprechende Regelungen für Schredder eingeführt und damit auch die Forderungen der BVT-Schlussfolgerungen umgesetzt.

## **2.8 Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)**

Die TA Lärm verdient im Kontext der Gesetzeshierarchie und als eigenständige Verwaltungsvorschrift ein separates Kapitel. Durch den Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit jedoch, werden die rechtlichen Regelungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche sowie entsprechende Maßnahmen gegen diese, hier nur kurz erwähnt. Die TA Lärm gilt für genehmigungsbedürftige und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen und fordert Immissionsrichtwerte, deren Einhaltung im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nach BImSchG entweder in Form einer Lärmprognose oder durch Immissionsmessungen nach der Inbetriebnahme nachzuweisen ist. Für den Betrieb von Schredderanlage sind die Randbedingungen der TA Lärm als weniger kritisch einzustufen [14].

### **3 Stand der Technik an Schredderanlagen**

Als Einführungskapitel in der Technik, setzen die folgenden Abschnitte weniger auf eine Detailbeschreibung des Schredders als Großmaschine, sondern vermitteln vielmehr einen Gesamtüberblick über den Verarbeitungsprozess des Schreddervormaterials zum Fertigprodukt. Dadurch wird die Schredderanlage zum Gegenstand betriebs- und verfahrenstechnischer Prozesse im Entsorgungsbetrieb und den interdisziplinären Lösungsansätzen entsprechend, im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift diskutiert.

Die weitere Verwendung des Produktbegriffes orientiert sich damit einhergehend an der betriebswissenschaftlichen bzw. produktionstechnischen Terminologie. Eine Verbindung zur formalrechtlichen Ausführung wird hiermit und wenn nicht anderweitig im Text vermerkt, ausgeschlossen.

#### **3.1 Produktionssystem Schrottplatz**

Im Jahr 2019 werden weltweit 1.158 aktive Schredderanlage im Schrottsegment gelistet, davon 300 Anlage in der EU [18]. Schredderanlagen zur Aufbereitung von Fe- und nichteisenmetallischen (NE) Abfällen, gehören zu den größten Betriebseinheiten des klassischen Schrottplatzes. Schrottplätze sind gemäß VDI-Richtlinie 4085 bestimmte Flächen, die im Wesentlichen der Lagerung, Behandlung, Verwertung und dem Umschlag von Schrotten dienen und Fe- sowie NE-Metalle für den industriellen Einsatz in Stahlwerken, Gießereien und Metallhütten vorbereiten. Strukturell gestaltet sich ein Großschredderbetrieb als verrichtungsorientierte Organisation. Er gliedert sich in diverse administrative, betriebliche und vertriebliche Funktionen [19]. Abbildung 1 stellt diese mit dem Verlauf der Wertschöpfungskette von der Beschaffung bis zur Veräußerung systematisch dar.



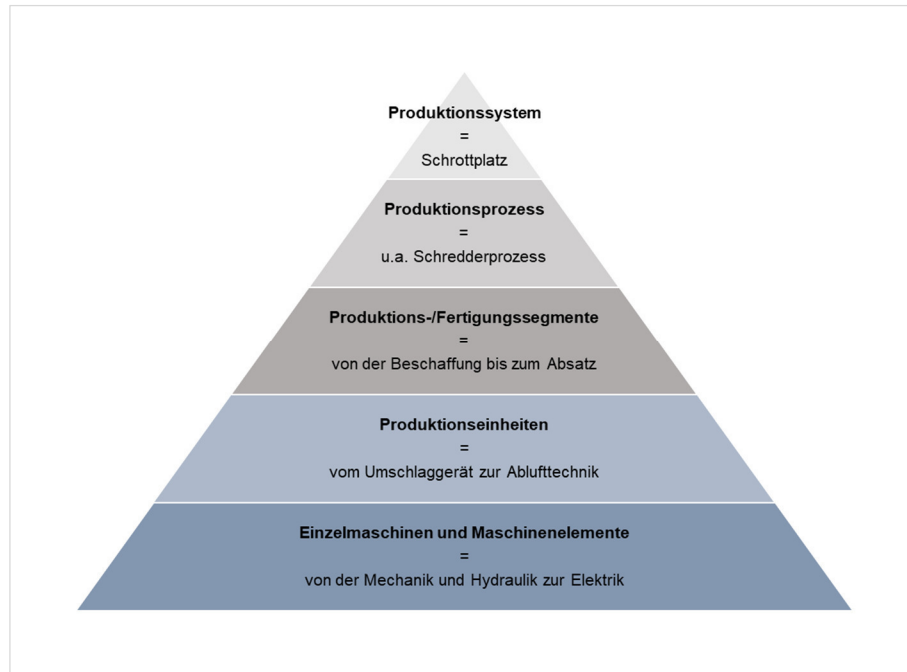
Abbildung 1: Organisatorische Funktionen des Großschredderbetriebes

In diesem Kontext wird der Schrottplatz zum übergeordneten Produktions- bzw. Fertigungssystem (Abbildung 2) als Teil der Kreislaufwirtschaft und umfasst den gesamten betrieblichen Leistungsprozess. Das Produktionssystem erfüllt dabei idealer Weise den Zweck der qualitäts- und kostenoptimierten Erzeugung von ordnungsgemäßen Produkten nach Art und Menge zum richtigen Zeitpunkt [20].

### 3.2 Schredderprozess und Fertigungssegmentierung

In Folge dieser Betrachtungsweise wird der Schredderprozess zum Produktionsprozess und dadurch vom klassischen Begriff der Aufbereitung entkoppelt. Der Schredder ist fester Bestandteil des Produktionssystems und für die Umwandlung von Rohmaterial in Fertigteile oder Produkte, unter dem Einsatz vorhandener und/oder zu beschaffender Ressourcen eingesetzt [20]. Durch diese Definition steht der Begriff „Produkt“ neben dem Abfall für die am Schredder erzeugten wertschöpfenden Fraktionen. Grundsätzlich sind alle am Schredder verarbeiteten Stoffströme unter dem klassischen Abfallbegriff zu führen. Im Kontext dieser Arbeit jedoch, wird der Begriff „Abfall“ für solche Ausgangsströme eingesetzt, die keiner weiteren stofflichen Aufbereitung zuzuführen sind bzw. derzeit eher den Weg über eine thermische oder deponiegerechte Verwertungsrouten nehmen.

Die Nomenklatur des Schredderprozesses in der Form des Fertigungsprinzips, hilft das Systemkonzept dieser Arbeit unter technischen, betriebswirtschaftlichen und immissionsrechtlichen Gesichtspunkten transparent abzubilden und wissenschaftlich zu hinterlegen.



**Abbildung 2: Das Produktionssystem Schrottplatz in Anlehnung an die modulare Fabrik [21]**

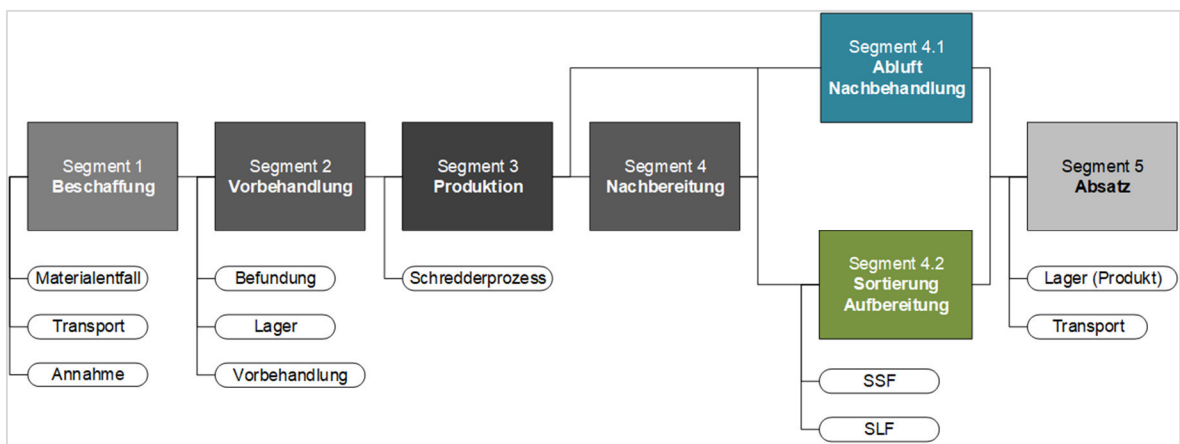
Der eigentliche Schredderprozess wird in der Kombination verschiedener Produktionssegmente und Nebeneinrichtungen abgebildet, die wiederum in einzelne Produktionseinheiten zu unterteilen sind. Systemteile der Produktionseinheiten sind dann wieder Einzelmaschinen und ihre Maschinenelemente. Entgegen der klassischen Literatur des BDSV (Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.) [14] unterscheidet diese Arbeit nicht nur zwischen Anlagenbereichen des Schredders als Teil des Vorbehandlungs-, Haupt- und Nachbehandlungsprozesses, sondern nimmt eine zusätzliche Segmentierung der übergeordneten Betriebseinheit vor [22]. Der Schredderprozess gliedert sich folglich in fünf operative Segmente:

1. die Beschaffung,
2. die Vorbehandlung,
3. die Produktion,
4. die Nachbereitung und
5. den Absatz [23].

Die den einzelnen Segmenten zugeordneten Tätigkeiten (bspw. Transport, Annahme, Befundung), richten sich nach den Anforderungen des in Kapitel 6 erfassten rechtlichen Rahmen für Großschredderanlagen. Auf Grund des emissionstechnischen Schwerpunktes dieser Arbeit, werden Verfahren zur Abluftnachbehandlung mit den sogenannten „Post-



Schredder-Technologien“ (PST) unter einem Segment erfasst. Die weitere Betrachtung der betriebs- und produktionsrelevanten Kennzahlen in den Kapiteln 8.3 und 9.3, erfordert darüber hinaus die Einbindung der vor- und nachgelagerten Behandlungsprozesse am Schredder. Diesem Umstand ist geschuldet, dass auch der Absatz des Produktportfolios, Einzug in die Segmentierung des Schredderprozesses findet. Durch diese Form lassen sich die Zusammenhänge aus Schredderinput, Aufbereitungstechnik, der Produktdiversifikation und dem Schwerpunkt Emissionen, linear im Gesamtprozess abbilden (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Produktionssegmente des Schredderprozesses [24]**

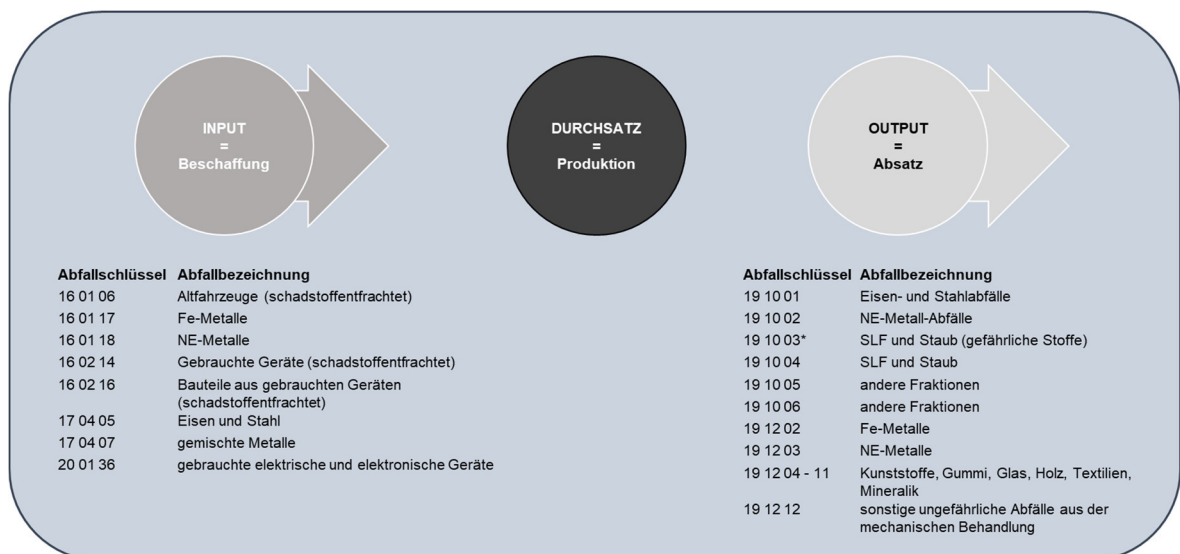
In der weiteren Verwendung steht dem so definierten Schredderprozess, der Begriff „Schredder“ als Produktionseinheit der Schredderanlage entgegen. Um einer Unschärfe bei der Nutzung der Begrifflichkeiten von „Schredder“ und „Schredderprozess“ in dieser Arbeit vorzubeugen, wird im Text separat darauf hingewiesen, sollte es sich lediglich um das mechanische Zerkleinerungsaggregat, ausgebildet als Hammerbrecher bzw. -mühle oder ergänzend dazu um den Zerkleinerungsprozess an der Schredderanlage handeln. Obwohl im maschinenbau- bzw. aufbereitungstechnischen Sinne ein Brecher, wird in dieser Arbeit der Begriff „Mühle“ für die genannte Produktionseinheit vorgezogen.

Von den obigen Definitionen ausgehend, ist die Schredderanlage, als die den gesamten verfahrenstechnischen Aufbereitungsprozess der Abbildung 3 führende Betriebseinheit, zu verstehen.

### 3.3 Großschredderanlagen im Schrottreycling

Das primäre Ziel einer Großschredderanlage liegt in der verfahrenstechnisch ökonomischen Aufarbeitung von heterogenen Fe-, NE- und reststoffhaltigen Stoffströmen und der

daraus resultierenden ökologischen Rückführung sekundärer Rohstoffe in den Wirtschaftskreislauf [14]. Die effiziente Ausbringung werthaltiger Stoffgruppen und Produkte ist dabei genauso relevant, wie die Entsorgung von Abfällen aus dem Schredderprozess. Materialverbunde aus leichtem Misch- und Sammelschrott mit Metall- und Fremdanhaftungen, stellen neben Autokarosserien den größten Anteil des Inputmaterials an Schredderanlagen dar (Verweis Kapitel 11.2). Der Aufschluss immer komplexerer Produkte aus Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden sowie die Aufbereitung von Sonderfraktionen aus der Müllverbrennung (MV), aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) oder Weiße Ware, machen einen zunehmenden Anteil der Kapazitäten an den Produktionsagregaten aus. Die Liste der relevanten Inputströme (Abbildung 4) aus Altfahrzeugfraktionen, Konsumgüter- und Komplexschrotten macht deutlich, wie vielfältig der behandelte Materialstrom in Schredderanlagen sein kann und wie individuell die Anforderungen an den Aufbereitungsprozess sind.



**Abbildung 4: Liste der typischen Abfallströme an Großschredderanlagen in Anlehnung an die Produktionswirtschaft [23]**

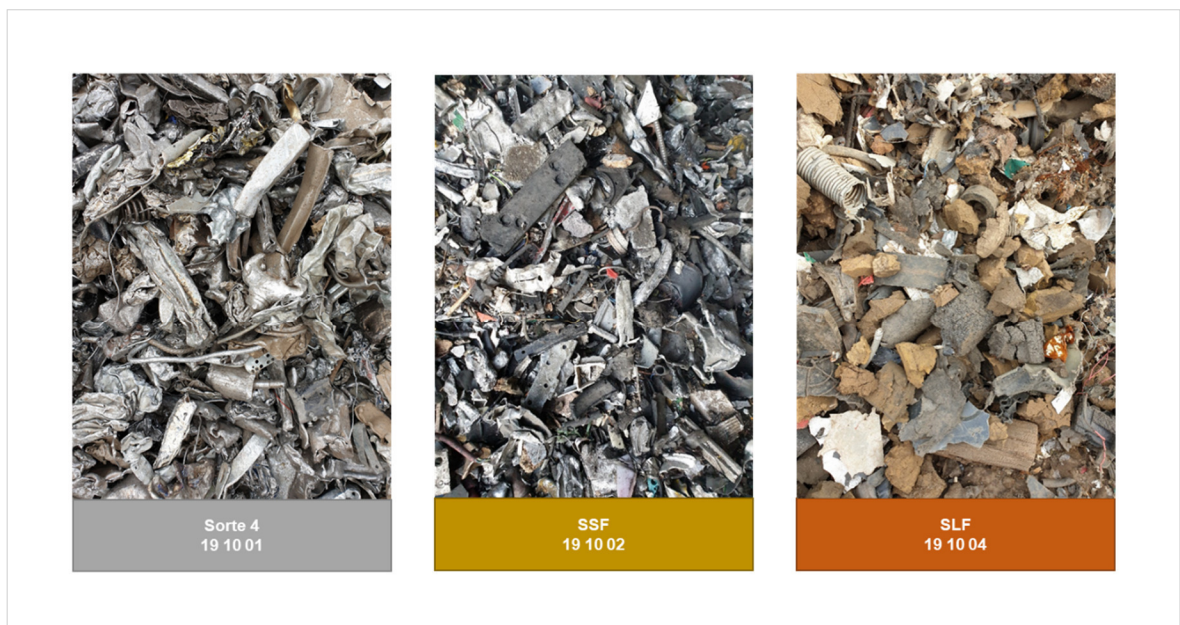
Abbildung 4 stellt die wesentlichen Input- und Outputströme an Großschredderanlagen gegenüber. Hinter den einzelnen Abfallschlüsseln verbergen sich Sortenspezifikationen, die i.d.R. einer weiteren betriebsinternen Einteilung in Untersorten und/oder einer Qualitätsbeschreibung bedürfen. Die für eine Schredderanlage zugelassenen Materialströme, Verarbeitungs- und Lagermengen sind Teil der Anlagengenehmigung. Die Verwendung des Begriffs „Schreddervormaterial“ steht in dieser Arbeit als Sammelbegriff für das Sortenspektrum im Input des Schredders und bedarf keiner weiteren Spezifikation.

Die Outputströme am Schredder wiederum bestehen aus drei Hauptfraktionen:

- die Stahlschrottfraktion Sorte 4 bzw. E40 (Sortennummer)
- die Schredderschwer- (SSF) und
- die Schredderleichtfraktion (SLF).

In der EU-Schrottsortenliste (Fassung vom 01. Juni 1995) wird die Sorte 4 mit einer Stückgröße kleiner 200 mm für 95 % der Ladung und 5 % kleiner 1.000 mm, bei einem Reinheitsgrad von größer 95 % Fe (schutt- und legierungsfrei) und einer Schüttdichte von größer 0,9 t/m<sup>3</sup> definiert [25]. Der Schredderschrott macht an Großschreddern ca. 65 bis 75 Gew.-% des Outputs aus dem Aufbereitungsprozess aus [12]. Wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die E40 an Stelle der Sorte 4 genannt, ist damit immer die Outputsorte und nicht die EU-Sortennummer allein stehend gemeint.

Die als Schredderrückstände geführten Fraktionen SSF und SLF werden weiter aufbereitet und/oder der stofflichen bzw. energetischen Verwertung in Form der Deponie/Versatz bzw. der Verbrennung oder seltener Pyrolyse zugeführt [12]. Die Abfälle sind gemäß AVV als Spiegeleinträge ausgewiesen und können daher als gefährlicher oder nicht-gefährlicher Abfall eingestuft werden.



**Abbildung 5: Kernoutputsorten an Schredderanlagen**

Die unmagnetische SSF setzt sich stofflich aus NE-Metallen, legierten Edeltählen, Kunststoffen, Gummi, Glas und inerten Reststoffen zusammen. Je nach Vormaterialkomposition bildet die Outputfraktion ca. 5 bis 11 Gew.-% des verarbeiteten Massenstroms. Durch die hohe Anreicherung der NE-Metalle von teilweise mehr als 60 Gew.-%, stellt diese Fraktion ein entscheidendes Wertstoffpotential dar [12].

Die vergleichsweise weniger wertstoffhaltige, aber komponentenreiche SLF schwankt zwischen 15 bis 25 Gew.-% des verarbeiteten Massenstroms. Sie setzt sich nach der VDI-Richtlinie 4085 primär aus Kunststoffen, Gummi, Textilien, Holz, Glas, Metallen und feinkörniger Mineralik zusammen.

Die SLF ist ein Stoffstrom aus der Leichtstoffabscheidung im vierten Schreddersegment. Auf Grund der unterschiedlichen Verwertungsoptionen, wird diese Fraktion siebklassiert, sodass zwischen dem Fein- und Grobanteil der SLF (SLF-fein und SLF-grob) differenziert werden kann. In Anbetracht der zunehmenden Verwendung von Kunststoffen und Faserverbunden in Konstruktionswerkstoffen und Funktionsbauteilen [26], ist davon auszugehen, dass der Anteil der SLF zukünftig weiter ansteigen wird. In Kapitel 11.2 dieser Arbeit wird die Entwicklung genauer betrachtet und in Verbindung mit den erfassten Schadstoffemissionen an der Schredderanlage gebracht.

### **3.3.1 Produktionsanforderungen an den Schredder**

Neben der eigentlichen Aufschlusszerkleinerung durch die Mühle [12], steht die Gewinnung vermarktbarer Stoffströme in der Nachbehandlung im Vordergrund. Die Produktion vermarktungsfähiger Stoffe ist aus technischer Sicht quantitativ und qualitativ abbildbar. Die darüber hinaus bedeutsamen wirtschaftlichen Aspekte, werden in Kapitel 4 dieser Arbeit aufgezeigt.

Die Quantität wird über die Massenleistungsfähigkeit der Anlage bestimmt und ist ein wesentlicher Faktor der Kostenreduktion im Produktionsprozess.

Qualitätsanforderungen an die Outputfraktion oder das Produkt, ergeben sich übergeordnet für die genannten Fraktionen aus

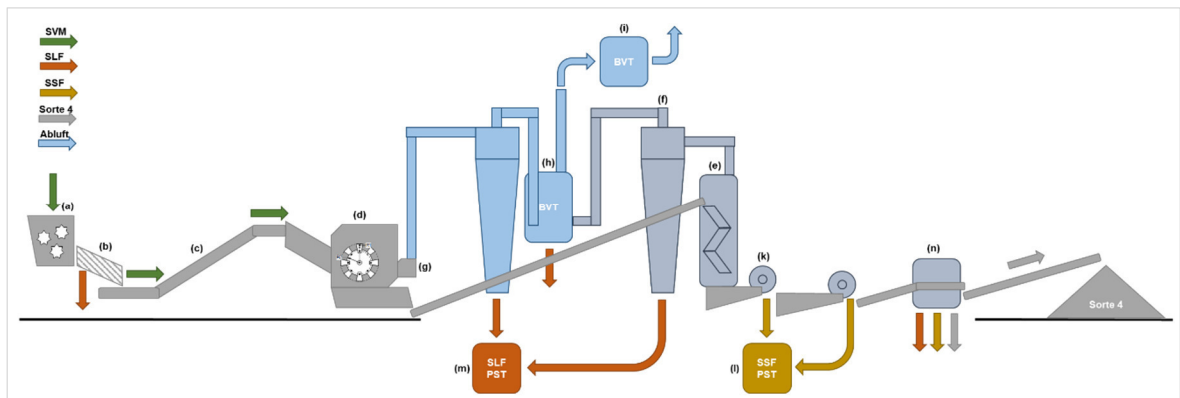
- der chemischen, bzw. metallurgischen Zusammensetzung (Homogenität),
- der stofflichen Verunreinigung durch Fremd- und Störstoffe (Schmutzanhaftungen, Rost, Hohlkörper),
- dem Eintrag von Feuchte durch Öl, Fett oder Wasser und
- der Schüttdichte, bzw. dem Kompaktionsgrad [12].

Entlang des Kapazitätsgrenzbereiches am Schredder, laufen die Größen Quantität und Qualität gegeneinander.

Eine Umsetzung des geforderten Qualitätsrahmens definiert die Beschaffung sowie die Tiefe der verfahrenstechnischen Prozesse am Aufbereitungsaggregat. So werden diverse Produktionseinheiten dazu eingesetzt, die Sortier- und Klassierfähigkeit des Vormaterials zu garantieren. Die dann nachgelagerten Produktionseinheiten im Fertigungssegment 4 erzeugen die spezifischen vermarktungsfähigen Qualitäten. Auf Grund der hohen Diversifikation von Schredderanlagen im Markt, ist es sinnvoll in diesem Einführungskapitel lediglich den technischen Aufbau der Kernaggregate zu beschreiben. In der Anlagenbeschreibung des Kapitels 9 werden dann solche Produktionseinheiten betrachtet, die kontextbezogen den Innovationsgedanken dieser Arbeit stützen.

### 3.3.2 Schredderaggregat und Peripherie

Das gegenwärtige Verfahrensfließbild in Abbildung 6 benennt die Kernkomponenten einer typischen Schredderanlage in Deutschland.

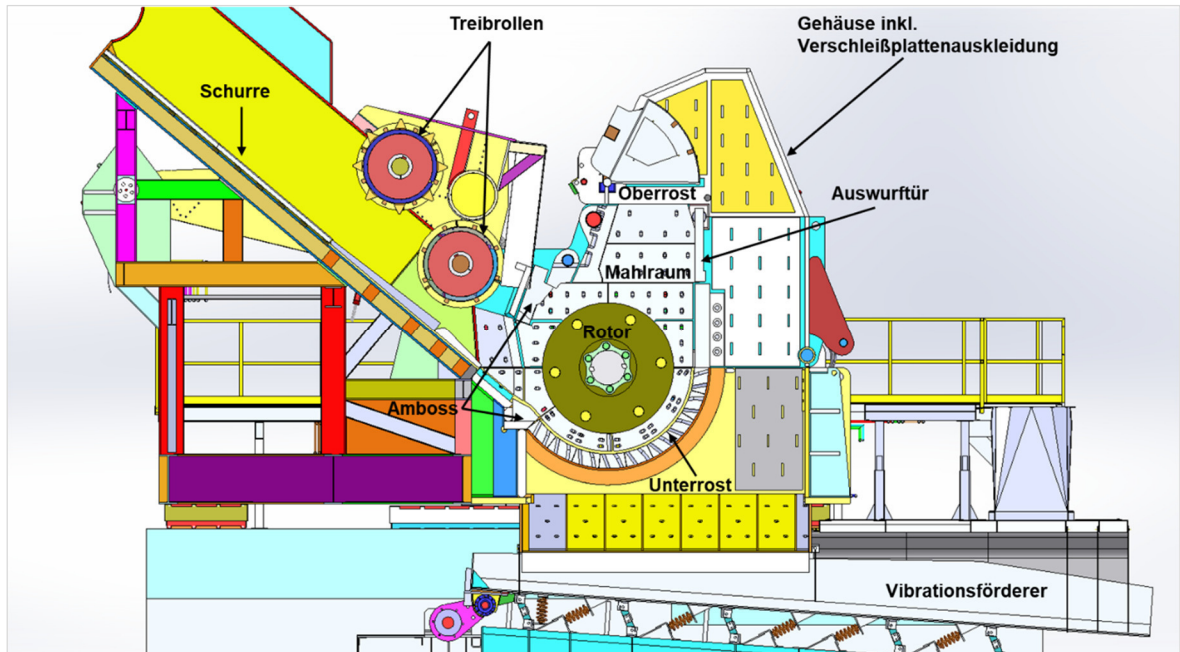


**Abbildung 6: Verfahrensfließbild einer Schredderanlage in vereinfachter Darstellung**

Im vorgelagerten Prozessschritt der Anlage befinden sich für die Vorsortierung oder Schadstoffentfrachtung eingesetzten Produktionseinheiten. Ein Vorzerreißer (a) dient der Fraktionierung speziell von Karossen, Karossenpaketen oder kompaktiertem Schreddervormaterial (SVM, hier als Sortenbezeichnung für leichten Mischschrott mit 15 % Fremdanhaftungen). Neben der Risikominimierung von Verpuffungen oder Schwerteilen im Zerkleinerungsprozess der Anlage, führt das System zu einer homogenen Bandbelegung im Rahmen der Anlagenbeschickung. Eine solche Sicherheitsvorrichtung ist vor Großschreddern eher in Ländern, wie Japan und Frankreich (Zwei- und Dreiwellenvorreißer) geläufig und

findet in dieser Konstellation weniger in Deutschland eine Anwendung. Ein Schwerlastsieb oder Stangensizer (b) vor dem Plattenbandförderer (c) reduziert den Feinkorneintrag in das System. Die ausgesiebte Fraktion wird nicht durch den Schredderprozess gefahren und kann anderweitig aufbereitet oder vermarktet werden. Die Verschleißeffekte der hochabrasiven Stoffe minimieren sich folglich in der Anlage. Ebenso, wie der Anteil der zu entsorgenden Fein- bzw. Mineralikfraktionen aus den Schredderrückständen (SSF und SLF). Der Stahlplattenförderer ist für Großschredderanlagen eine Standardanwendung zur Materialzuführung. Schredder mit geringerer Antriebsleistung (800 bis 1.250 kW) sind teilweise noch mit Kipptischanwendungen versehen, auf die das Umschlaggerät das Vormaterial auflegt.

Das eigentliche Zerkleinerungsaggregat (d) arbeitet, wie oben bereits ausgeführt, nach dem Prinzip der horizontal angeordneten Rotor- bzw. Hammermühle. Das aufgegebene Inputmaterial wird im Verfahren der Aufschlusszerkleinerung mechanisch in sortierfähige Stückgrößen produziert [12] und der nachgeschalteten Sortierung zugeführt. In Deutschland befinden sich auch Vertikalschredder im Einsatz, die aber weniger in der klassischen Misch- und Karossenschrottaufbereitung Anwendung finden. Der Fokus dieser Arbeit liegt damit im Kern in der Auswertung und Projektierung von Großschredderanlagen mit einer Ober- und Unterrostausführung, wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Schredder mit einem geschlossenen Boden sind gerade bei offenen Rotorausführungen (ohne Schutzkappen) ein geläufiges Mittel, aber auf geringere Durchsätze ausgelegt (i.d.R. kleiner 4.000 PS Antriebsleistung).



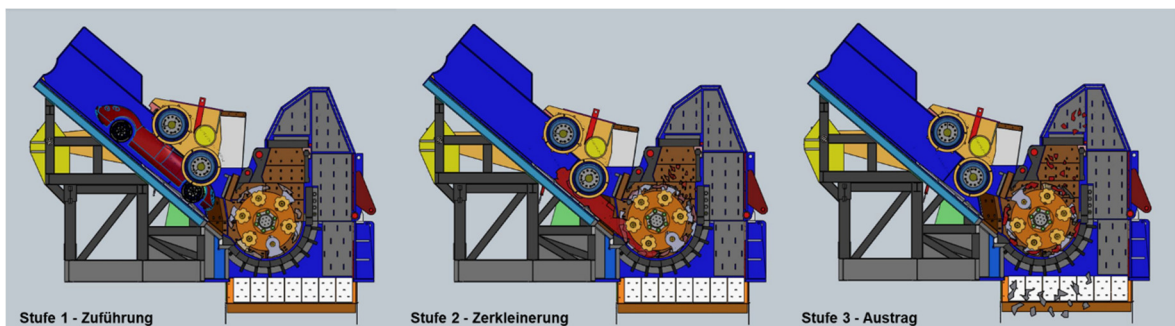
**Abbildung 7: Prinzipdarstellung eines Schredders in Anlehnung an Newell Recycling Equipment ©**

Der Schredder lässt sich neben der vorgenannten Mühle auf weitere Produktionseinheiten und Einzelmaschinen herunterbrechen. Die der Mühle vorgeschalteten Treibrollen dienen der Materialdosierung und haben einen zusätzlichen Vorverdichtungseffekt bei sperrigem Aufgabegut [27]. Die Schurre dient als Materialpuffer für die Materialzuführung durch das Plattenband und die Treibrollen. Rotor und Mahraum (ausgekleidetes Schreddergehäuse) sind die eigentlichen Werkzeugträger für den Zerkleinerungsvorgang und dynamisch gelagert [12]. Antriebsseitig ist der Schredder durch den Motor und die Sicherheitseinrichtungen in Form von mechanischen, hydrostatischen oder elektrischen Maschinenelementen und Kompensatoren ausgestattet (Kardanwelle, Kupplung, etc.). Großschredder werden weltweit mit einer Antriebsleistung von 500 bis 7.500 kW und einer Einlaufbreite von bis zu 3.000 mm gebaut. Ihr Schlagkreis variiert zwischen 1.000 mm und 3.000 mm. In der größten Ausführung sind Durchsatzleistungen von 400 t/h Schrott möglich, was einem Ausgang von ca. 300 t/h E40 entspricht.

Im Vergleich zur aufgezeigten Schredderausführungen mit unten- und/oder obenliegendem Rost (inklusive Rostabdeckung), sind Langsamläufer für die Aufbereitung von schwerem Mischschrott entwickelt. Sie drehen mit der Förderrichtung des Aufgabegutes und führen das sperrige Material gegen einen Schwenkrost und den nachgesetzten Amboss [14]. Sie sind für die weitere Betrachtung der hier geführten Forschungsthemen nicht relevant.

Der Austrag des zerkleinerten und verdichteten Materials erfolgt über eine Schwingfördererinne und entsprechende Gurtfördertechnik [27] [14]. Optional lässt sich der Oberrost schließen, um die Verweilzeiten und folglich die Aufschlusszerkleinerung des Schreddergutes im Mahlraum zu erhöhen.

Die in Abbildung 8 hintereinandergeschalteten Prozessschritte stellen den Zerkleinerungsprozess einer Karosse im Schredder stufenweise dar. In der ersten Stufe wird die Karosse über die Treibrollen vorkompaktiert und dem Mahlraum dosiert zugeführt. In der zweiten Stufe erfolgt die Zerkleinerung in einem kombinierten Schlag-, Prall-, Roll- und Scherprozess durch Hämmer und Ambos. Schritt 3 beschreibt den Austrag des aufgeschlossenen Schrottgemisches aus dem Ober- und Unterrost.



**Abbildung 8: Prozessschritte in der mechanischen Zerkleinerung von Schrotten im Schredder in Anlehnung an Newell Recycling Equipment ©**

Eine ausführlichere Beschreibung des Zerkleinerungsvorgangs und der dafür notwendigen Produktionseinheiten findet sich in Kapitel 9.2.1 dieser Dissertationsschrift unter der Betrachtung möglicher Weiterentwicklungspotentiale im klassischen Schredderprozess.

Die zerkleinerte Mischfraktion aus Fe- und Schredderrückständen wird im weiteren Verfahren der Abbildung 6 mittels Windsichtung (e) in ein Leicht- und Schwergut getrennt [12] (siehe auch VDI-Richtlinie 4085). Die in der Prozessluft abgetrennte flugfähige SLF wird dabei in Zyklonabscheidern (Aerozyklone bzw. Fliehkraftabscheider/-entstauber) mittels Zellradschleusen (f) ausgetragen. Bei dem Einsatz einer zusätzlichen Gehäuseabsaugung (g), wird die Prozessluft aus dem Schredderraum direkt einem Zyklonabscheider zugeführt und das Leichtgut entsprechend separiert. Die Abscheidung der in der Prozessluft enthaltenen Feinstpartikel bzw. Feststoffe, erfolgt i.d.R. über eine Nass- oder Trockenfiltrierung in Form eines Nassabscheiders (Venturi-Wäscher, o.ä.) und/oder eines Gewebeschlauchfiltersystems (h) [28] [29] [30] [31]. Zur weiteren Schadstoffreduzierung der Schredderabluft sind Abgasrückführungs- oder gesonderte Abluftnachbehandlungssysteme (i) möglich (siehe dazu auch Folgekapitel 3.3.2.1).



Das nach dem Sichterprozess verbliebene Schwergut wird über eine Magnetabscheidung (k) in eine Fe-Fraktion (Cu-Fe-Anker, Langteile, Störstoffe und Sorte 4) und die SSF getrennt [14]. Über die nachgeschaltete PST (l) in Form der Stoffstromklassierung durch Siebung und Sichtung, der trocken- oder nassmechanischen sowie sensorgestützten Sortierung, werden diverse vermarktungsfähige Unterfraktionen und Produkte erzeugt. Auf die Detailbeschreibung der SSF-Aufbereitung wird in dieser Arbeit auf Grund der geringen Emissionsrelevanz schwerpunktbezogen verzichtet.

Entsprechend der SSF, kann die PST zur Verarbeitung der SLF (m) mit einer hohen Wertschöpfungstiefe verbunden sein. Ein wesentlicher Schritt in der Verarbeitung der SLF ist die Feinkornabsiebung. Die daraus generierte Unterfraktion SLF-fein (Absieb) wird als Mineralikfraktion aus dem Schredderprozess ausgeschleust und i.d.R. als Versatzfraktion im Untertageversatz oder als Deponiebaustoff verwertet. Als Alternative zum Ersatzbrennstoff, kann die verbleibende hochkalorische SLF-grob (Heizwert größer 11 MJ/kg) verfahrenstechnisch umfangreich aufbereitet werden [12]. Ansätze dazu werden in Kapitel 9.2.3.3 dieser Arbeit geliefert.

Die den Hauptmaterialstrom bildende Fe-Fraktion wird am Ende des Schredderprozesses in einer händischen Inlinenachsartierung (n) von Störstoffen (siehe auch Kapitel 9.2.3.2) bereinigt und dem Zwischenlager oder einer Direktverladung zugeführt.

### **3.3.2.1 Adsorption durch Aktivkohle (AK) in der Ablufttechnik**

Die Ablufttechnik an Schredderanlagen ist unabhängig ihrer Rolle in der aufgezeigten Stoffstromklassierung und Fraktionsaufbereitung, ein wesentliches Verfahrensmittel für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten in der Schredderabluft. Der umweltschutztechnische Schwerpunkt dieser Arbeit legt nahe, spezifische Grundlagen für solche Abluftreinigungstechniken zu liefern, die in der Konzeptstudie des Kapitels 9 eine wesentliche Systemrolle einnehmen.

Auf die Ausführung von allgemeinen Funktionsbeschreibungen der klassischen Windsichter- und Staubbindetechniken, wird auf Grund der Fülle an Anwendungsoptionen und allgemein guter Zugänglichkeit zur Sach- und Fachliteratur, verzichtet.

Die Verwendung von Adsorbentien, wie AK im Abgasreinigungssystem des Schredders ist für den Forschungsteil dieser Arbeit von besonderer Relevanz (speziell Kapitel 9.2.2).

Die physikalische Adsorption ist ein geläufiges Verfahren, um gasförmige Bestandteile, die als Schadgase aus Gemischen unterschiedlicher Gaskomponenten enthalten sind, aus dem Trägergas zu entfernen [28]. Dafür werden selektiv einzelne oder mehrere organische

oder anorganische Verbindungen aus dem Abgas an die Grenzfläche einer festen Phase angelagert (Van-der-Waals-Kräfte). AK wird als grenzflächenaktiver kohlenstoffhaltiger Feststoff am weitest häufigsten für die Adsorption organischer Verbindungen aus der Gas- oder Flüssigphase eingesetzt. Im Verhältnis zu ihrer Masse besitzt AK eine große innere bzw. spezifische Oberfläche von 500 bis 1.500 m<sup>2</sup>/g (poröse Struktur) [12] [32].

In der industriellen Anwendung durchströmt das VOC- bzw. schadstoffbeladene Abgas den mit AK oder anderen Adsorbentien gefüllten Adsorber. Die Adsorption der im Abgas gebundenen Moleküle an den Feststoff wird u.a. durch den Partialdruck des Adsorptivs in der Gasphase und die Temperaturgegebenheiten im Prozess beeinflusst. Bei der Adsorption handelt es sich stets um einen exothermen Prozess.

Durch den Kontakt eines Trägergases mit der AK erniedrigt sich dessen Konzentration. Die zeitliche Exposition der Medien zueinander führt zu einem Adsorptionsgleichgewicht. Die Besetzung der an der Oberfläche der AK befindlichen freien Positionen (aktive Zentren) ist endlich. Sobald die gesamte aktive Oberfläche mit dem Adsorpt besetzt ist, ist die maximale Beladungskapazität der AK erreicht (Sättigung). Die Adsorptionskapazität beschreibt in diesem Zusammenhang die Höhe der Aufnahmefähigkeit eines Stoffes auf der AK im Verhältnis zu seiner in der umgebenden Phase konzentrierten Menge. Zur Verbesserung der Aufnahmefähigkeit kann die AK chemisch aktiviert bzw. imprägniert werden [32] [33].

Die Geschwindigkeit mit der die Sättigung des Adsorbens erreicht ist, wird als Adsorptionsgeschwindigkeit bezeichnet. Folgende Parameter nehmen Einfluss auf die Adsorptionsgeschwindigkeit der AK:

- die Art der AK (pflanzlich, tierisch, mineralisch oder petrochemisch),
- die Korngröße und Struktur,
- die Porenradialhäufigkeit und -verteilung,
- Oberflächenimprägnierung (zusätzliche Additive),
- die Adsorptionstemperatur,
- Druck und Dichte,
- die physikalisch-chemischen Eigenschaften der zu adsorbierenden Substanz (molekulare Masse, Siedepunkt, Konzentration etc.),
- die Beschaffenheit der umgebenden Gas- oder Flüssigphase (Zusammensetzung des Gasgemisches, relative Feuchte),
- der Volumenstrom des Abgases und
- die verwendete Verfahrenstechnik [34] [33].

Die Adsorptionsgeschwindigkeit reduziert sich mit fortschreitender Sättigung der AK. Eine Reaktivierung des Adsorbats (Desorption) ist bei der Physisorption vor dem Erreichen der Sättigungskapazität möglich und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten heraus sinnvoll [34] [31].

Für die Reduzierung der VOC im Abgasstrom des Schredders, werden Festbettadsorber eingesetzt (VDI-Richtlinie 3674). Bei diesem Verfahren strömt das zu reinigende Abgas durch das ruhende Adsorbens. Die Konzentrationsabnahme im Abgas führt zu einem entsprechenden Beladungszuwachs auf der AK, der sich über ein Beladungsprofil (Verlauf der Beladungszone) abbilden lässt [29] [33].

Zu Beginn einer Adsorptionsphase ist bereits der erste Teilbereich der AK-Schüttung in der Lage die Schadstoffkonzentration im Abgas auf einen Minimalwert zu bringen. Diesem Umstand ist geschuldet, dass in den höher liegenden Schichten des Bettes, keine oder nur geringfügige Adsorptionsvorgänge stattfinden. Die Adsorptions-, auch Massenübergangszone, liegt im unteren Bereich des AK-Bettes. Das Konzentrations- und Beladungsprofil wandert im Laufe der Betriebszeit in Durchströmungsrichtung. Mit zunehmender Sättigung der Eintrittszone, flacht das Konzentrationsgefälle in der Adsorptionszone ab. Nähert sich die VOC-Konzentration im Filterauslass der Eingangskonzentration, ist das Adsorbat auf der Gesamtlänge der Festbettsäule gesättigt. Die Adsorptionszone bricht durch [32] [31]. Abbildung 9 stellt diesen Verfahrensprozess in drei Schritten systematisch dar.

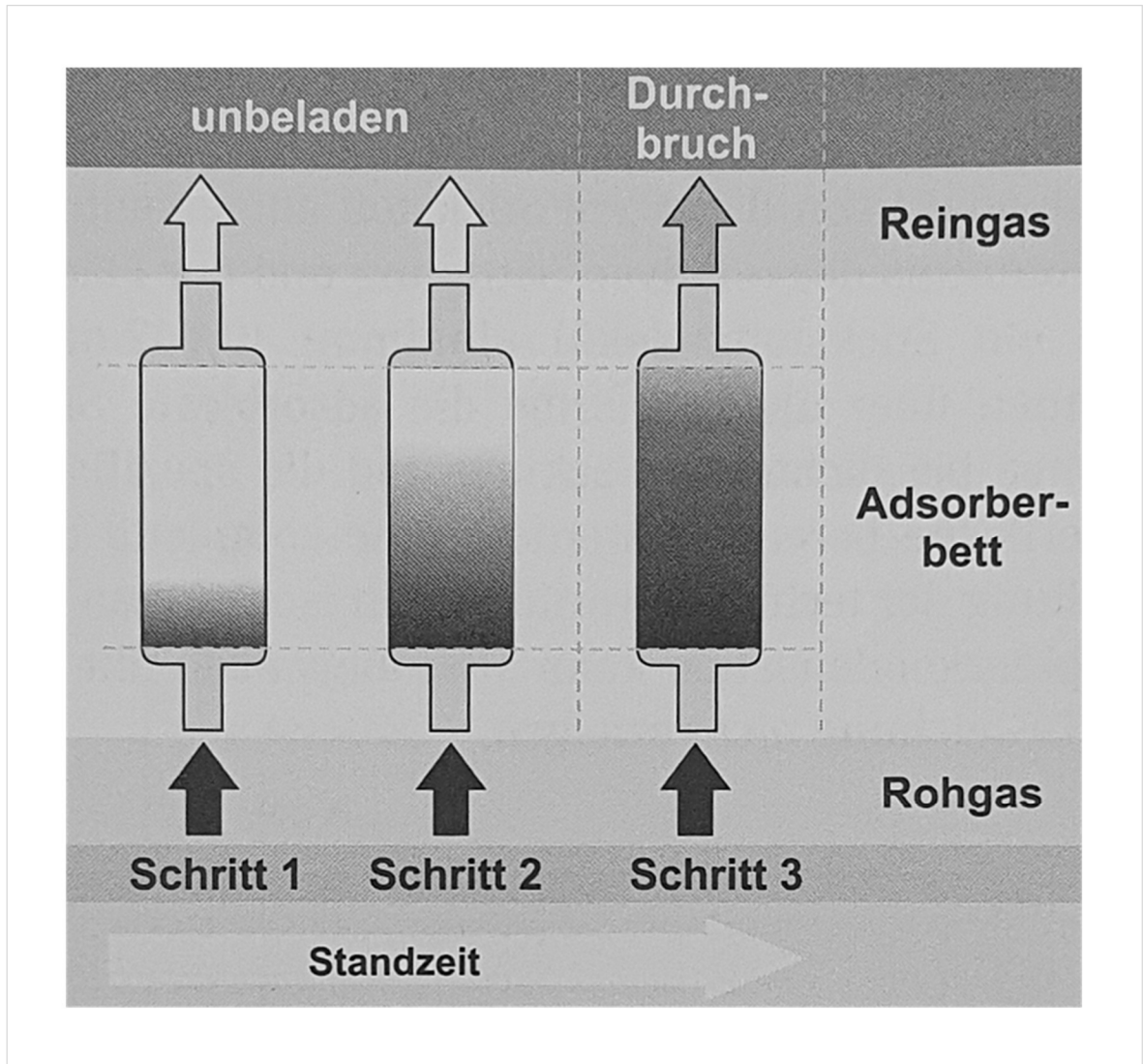


Abbildung 9: Beladungsvorgang eines AK-Festbettes in drei Schritten [32]

Der Durchbruch gilt auch in solchen Fällen, in denen die Störstoffe noch gebunden werden, aber die geforderten Grenzwerte im Ausgang des Filters gerade überschritten sind. Das Durchbruchverhalten einer AK-Schicht richtet sich neben den konstruktiven Parametern (Schütthöhe, -dichte etc. in Abhängigkeit des Druckverlustes und Volumenstroms) auch nach Faktoren, wie der Feuchte, Verunreinigungen im Abgas sowie Verdrängungseffekten bei der Anwendung auf verschiedene Adsorptivkomponenten [33].

### 3.3.2.2 Steuerungstechnik an Schredderanlagen

Die Verarbeitung von komplexen Schrotten im Schredder funktioniert selten unter konstanten Betriebsbedingungen. Die Anlage reagiert ständig auf die stofflichen Schwankungen im Vormaterial oder Unterbrechungen in der Zuführung bzw. Beschickung der Mühle. Diese

wechselnden Betriebsbedingungen wirken sich neben den quali- und quantifizierbaren Kenngrößen, auch emissionsseitig aus.

Im Zuge der Anlagenführung werden die einzelnen Produktionseinheiten daher prozess-technisch miteinander verknüpft. Durch die übergeordnete Einbindung einer Steuer- und Regelungstechnik in Form von Produktions-/Prozessleitsystemen (PLT) und elektronischen Auswerte- sowie Sicherungseinrichtungen, lässt sich der Schredderprozess kontrollieren und verfahrenstechnisch abbilden.

**Tabelle 1: Auszug typischer Maschinendaten eines Schredderaggregats**

Maschinendaten	Einheit
Datum und Zeitangaben	(format)
Produktionsleistung sortenbasiert Waagenausgabe	[t]
Positionsangaben, Distanzen und Ausrichtung der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[% / ‰]
Soll- und Bewegungsgeschwindigkeit der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[m/s / %]
Drehzahl der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[1/min]
(Ist-)Spannung der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[V / %]
Stromaufnahme der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[A]
(Ist-)Leistung der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[kW / %]
Ist-Frequenz der Haupt-/Nebenantriebe und Maschinenelemente	[Hz]
Leitwert Hauptantriebe	[mS]
Öl-/Flüssigkeitsniveau Tank Haupt-/Nebenbewegungen, Antriebs- und Schmiersysteme, Eindüsungen etc.	[mm]
Öl-/Flüssigkeitstemperatur Zu-/Ablauf und Tank Haupt-/Nebenbewegung, Antriebs- und Schmiersysteme, Eindüsungen etc.	[°C]
Ölfilterbeladung	[%]
Durchflussmengen Haupt-/Nebenbewegungen, Antriebs- und Schmiersysteme, Eindüsungen etc.	[l/min]
Druckangaben Haupt-/Nebenbewegungen, Antriebs- und Schmiersysteme, Eindüsungen etc.	[bar]
Thermische Kapazität Hauptantrieb	[°C / %]
Wicklungstemperaturen Hauptantriebe (speziell Hauptmotor)	[°C]
Lagertemperaturen Haupt-/Nebenantriebe (speziell Motor- und Rotorlagerung)	[°C]
Verbrauchsrate Werkzeuge und Verschleißplatten	[% / t]
PLT- und SPS-Systemzustände und -beschreibungen (Maschinenstatus, Störung, Auslastung, Zeit- und Schaltungsintervalle etc.)	(status) / [% / s]

Die PLT steht an dieser Stelle als Synonym für die ganzheitliche Betrachtung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, der Informationstechnik sowie Informatik im Produktionsprozess und unterstützt bei der transparenten Darstellung systemimmanenter Daten gegenüber dem Anwender (Kommunikationsschnittstelle). Die generierten Maschinen- und Prozessdaten dienen im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) dann der Produktivitätsevaluation und Betriebsüberwachung [20] [35]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit automatisiert in die Produktionsteuerung einzugreifen (Assistenzsysteme) und die Anlage effizienzorientiert zu fahren.

In Tabelle 1 sind wesentliche Maschinendaten für Schredderanlagen aufgelistet. In Verbindung mit einem EDV-gestützten Warenwirtschaftssystem, lassen sich grundlegende Erkenntnisse über die Leistung und Wirtschaftlichkeit eines Schredderprozesses gewinnen und daraus betriebliche Leistungskennzahlen definieren sowie technische Verbesserungsmaßnahmen ableiten. Konkretere Ausführungen zu diesem Themenbereich finden sich in den Kapiteln 8.3 und 9.2.4 dieser Arbeit.

## **4 Wirtschaftliche Strukturen an Schredderanlagen**

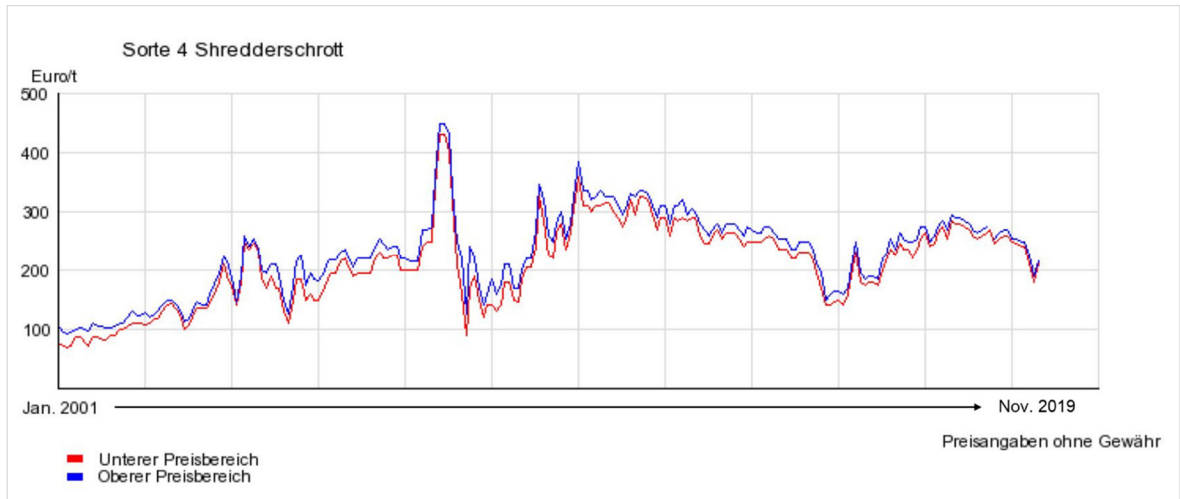
Das nachfolgende Grundlagenkapitel stellt die wirtschaftlichen Strukturen und Einflussparameter an Schredderanlage dar. Es liefert u.a. grundlegende Ansätze zum Markt sowie der Wirtschaftlichkeit an Schreddern und bringt die klassische Struktur der Vollkostenrechnung in den Zusammenhang stoffstrom- und betriebsbasierter Kennzahlen der Warenwirtschaft und des Prozesscontrollings.

Auf Grund des ingenieurwissenschaftlichen Schwerpunktes dieser Arbeit und der sehr spezifischen Zugänge von Anlagenbetreibern zum Markt, werden im nachstehenden Marktbericht weder strategische Empfehlungen noch die individuelle Meinung der TSR dargestellt. Die Zahlen verstehen sich als Statusbericht über volatile Marktsituationen und die Rolle des Schredders im deutschen Schrottsektor.

### **4.1 Marktbericht Schrott- und Metallrecycling an Schreddern**

Als Sekundärrohstofflieferanten der stahlerzeugenden Industrie, speziell von Elektrostahlwerken, stehen Schredderbetriebe einerseits in einer starken Abhängigkeit zum Primärrohstoffmarkt, andererseits werden sie vom Absatz- und Preisgefüge ihrer Abnehmer gelenkt. Der deutsche Automobilsektor und Maschinenbau sowie die Stahlverarbeitende- und Bauindustrie, nehmen wiederum in Abhängigkeit gesamtpolitischer und wirtschaftlicher Herausforderungen, wesentlichen Einfluss auf den Rohstahlbedarf. Infolgedessen stehen der Schredder und allgemein Schrottreycler am unteren Ende der wirtschaftlichen Prozesskette und dadurch in voller Abhängigkeit ihrer vorgelagerten Abnehmer sowie deren Bedarfsmengen.

Die nachfolgende Preisentwicklung der Sorte 4 in Deutschland (Abbildung 10) zeigt einen positiven Preisverlauf für die besagte Kernoutputsorte von 2001 bis November 2019, weist aber unter Einbindung der spezifischen Schwankungsbreite, auch auf die Volatilität des Sekundärrohstoffmarktes hin.



**Abbildung 10: Preisentwicklung Sorte 4 von Januar 2001 bis November 2019**

Die aktuelle politische Lage in der Welt ist durch den Handelskonflikt zwischen den USA und China, dem „Brexit“ von Großbritannien, den Krisen im Nahen Osten und der koreanischen Halbinsel sowie der unsicheren politischen Lage in Hongkong und Russland geprägt. Auf einen Quellbezug für oben genannten Ereignisse, wird auf Grund der Schnelllebigkeit der Prognosen und konträren Stellungnahmen in der Meinungsforschung hierzu, verzichtet. Daneben beschäftigen die Absatzkrise der Deutschen Automobilindustrie und die damit verbundene Absatzschwäche der Autozulieferer und der Gießereien, die Schredderbetreiber zunehmend. Der Preisdruck der Elektrostahlwerke (Stahllieferanten) wird durch die Absatzschwäche im Automobilsektor quasi direkt an die Schredderbetreiber weitergegeben. Unsichere Marktbedingungen fordern ein hohes Maß an Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit von Recyclingunternehmen und ihren Prozessen. Der ständige Einfluss volatiler Marktstrukturen sowie Überkapazitäten im Markt, insbesondere durch Primärrohstoffe (Eisenerz) aus China, welches die Exportpreise für Flachstahl senkt, führen zu einer geringen Planbarkeit für den Einkauf, die Produktion und investitionsseitige Weiterentwicklungen von Prozessschritten an Schreddern. Auch unter dem Gesichtspunkt der umweltschutzrechtlichen Handlungsaufforderungen.

Der Industriebericht des Bundesverbands der Deutschen Industrie e.V. (BDI) prognostiziert einen Rückgang der Produktion des Produzierenden Gewerbes (ohne Bausektor) in Deutschland für das Jahr 2020 um 4,5 %. Nach den bereits seit Anfang des Jahres verzeichneten mittleren bis später starken Kapazitätsrückläufen (größer 4 %), stecke die deutsche Industrie nach sechs Jahren des Wachstums, spätestens seit dem Jahreswechsel 2018 zu 2019 in einer Rezession. Für das Verarbeitenden Gewerbe werden ähnliche Anstiege verzeichnet [36].

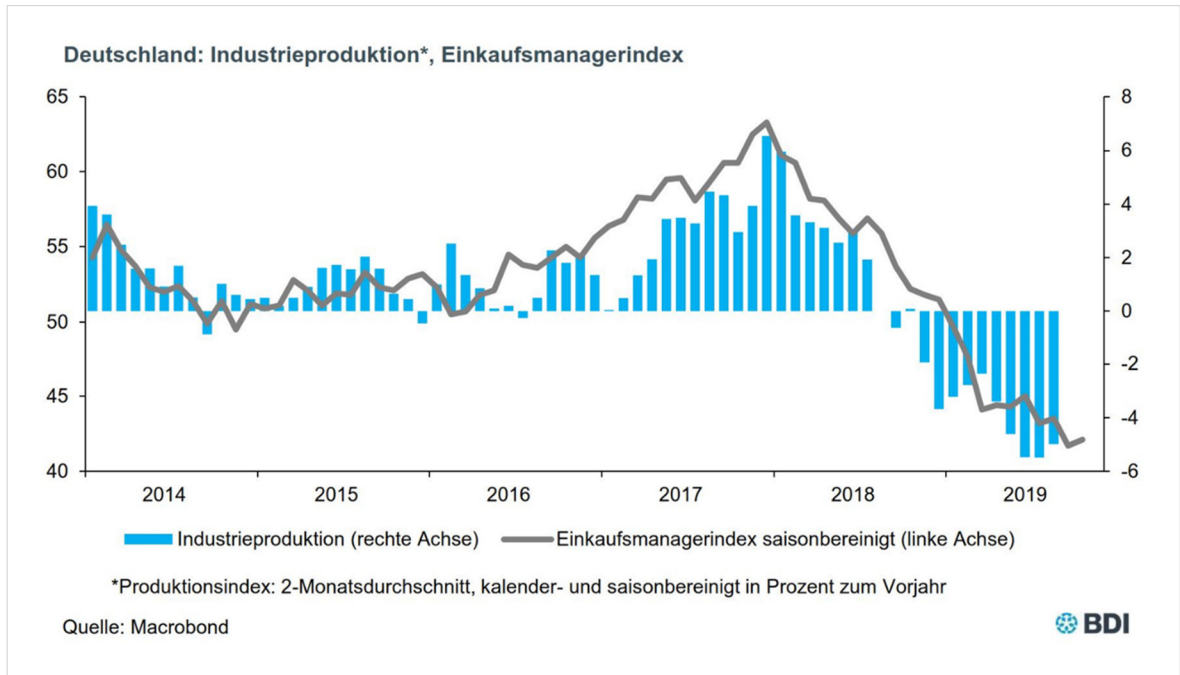


Branchenbezogen und für den Schrottabsatz relevant, schwächeln besonders die Metallverarbeitende Industrie (minus 3 %) und Elektroindustrie (minus 3,8 %). Der weltweiten Nachfrageschwäche nach Personenkraftfahrzeugen und dem Strukturwandel der Automobilindustrie (Elektromobilität) geschuldet, verzeichnet der Automobilsektor Produktionsrückgänge von mehr als 10 % und minus 12 % für den Export.

Die Marktversorgung durch Walzstahl ist seit Beginn des Jahres um 12 % gesunken. Auftragseingänge für Walz- und Rohstahl sind um 7 und 4 % zum Vorjahr abgeschwächt. In der deutschen Aluminiumindustrie wurden von Januar bis September 2019 8 % weniger Aluminium erzeugt (das entspricht in Summe 907.200 t Walz- und Strangpressprodukten), als im Vergleich zum Vorjahr.

Deutsche Gießereien befinden sich seit spätestens Frühjahr 2019, primär auf Grund der Absatzschwächen im deutschen Automobilbereich, in einem teilweise existenzbedrohenden Rezessionsmodus (Umsatzverluste von ca. 10 %) [36]. Diese Entwicklungen sind für die Schrottbranche alarmierend und führten kurzfristig zu Umsatzeinbußen im Sekundärrohstoffmarkt.

Der BDI rechnet u.a. unter Einbindung des Einkaufsmangerindex (siehe Abbildung 11), der Stimmungsindikatoren und der einzelnen Brancheneinschätzungen für das Jahr 2020 mit einem weiteren Rückgang der Produktion im Verarbeitenden Gewerbe um 4 %. Deutschland ist aktuelles Schlusslicht im konjunkturellen Abschwung der großen Volkswirtschaften der EU. Für Europa wird mit einem weiteren Rückgang des Produzierenden und Verarbeitenden Gewerbes in Summe größer 1 % für 2019 gerechnet. In Anlehnung an die erste Stagnation des Warenhandels seit 2009 und die weltweit abnehmende Industriekonjunktur, kann geschlussfolgert werden, dass die Aussichten auf Produktionssteigerungen an Schredderanlagen in Deutschland für das Jahr 2020 vorerst gering bleiben [36].

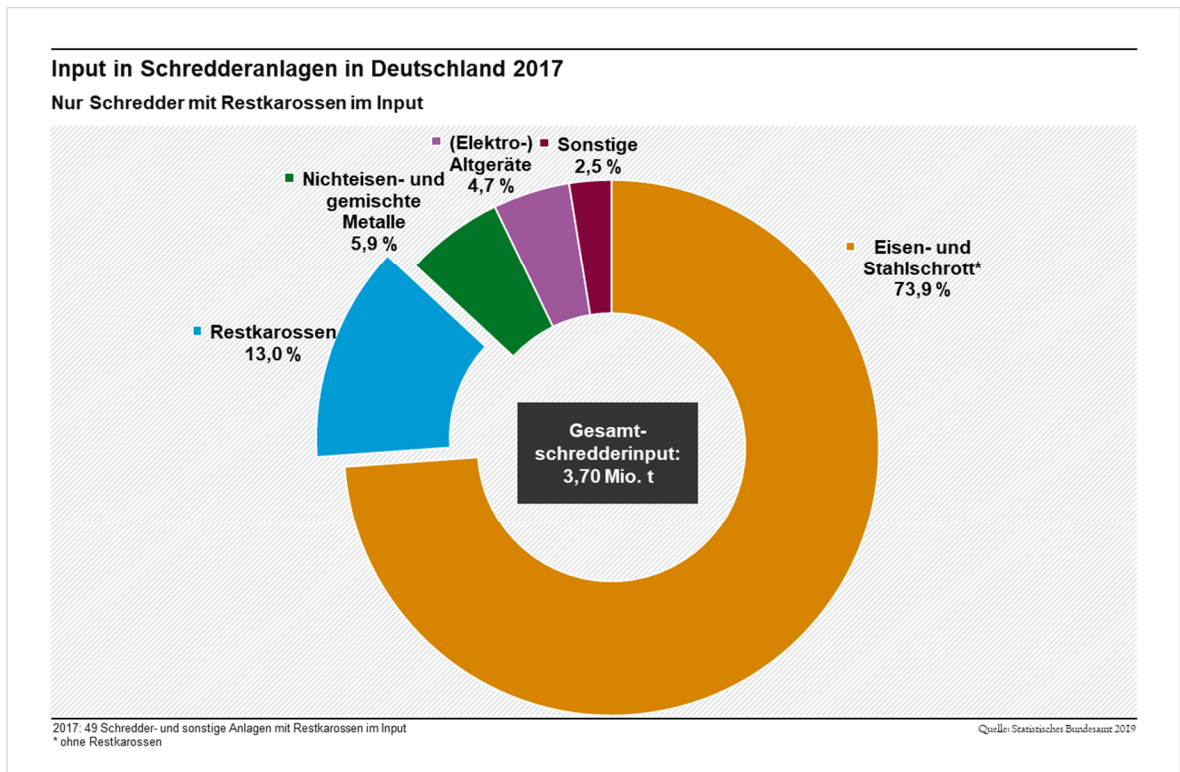


**Abbildung 11: Einkaufsmanagerindex in Deutschland von 2014 bis Oktober 2019**

Schredderbetriebe decken in Deutschland etwa 20 bis 25 % des Sekundärrohstoffbedarfs der Elektrostahlwerke ab. In Ländern wie Pakistan und Indien werden teilweise bis zu 100 % des Rohstahls aus Schredderschrott erzeugt. Auf Grund des hohen Schüttgewichts der Sorte 4 bzw. E40, kommt den deutschen Schredderbetreibern das Seecontainergeschäft in diese Länder zu Gute (Export). Für die Hochofenroute spielt die Sorte 4 eine nur untergeordnete Rolle [4]. Generell werden gemäß der deutschen Stahlrecyclingbilanz des BDSV von 2017 seit 2006 im Oxygenstahlwerk ca. 60 % weniger Fe- und Stahlschrotte zur Rohstahlerzeugung eingesetzt als im Elektrostahlwerk [37].

Die E40 ist im Vergleich zu einer Scherenschrottqualität im Einkauf i.d.R. teurer und wird abhängig von der Marktsituation und dem Preisgefüge sowie der regionalen Zugänglichkeit mehr oder weniger in der Rohstahlerzeugung der Elektrostahlroute berücksichtigt. Liegt die periodengetriebene Strategie der Stahlwerker in einer preisgünstigen Produktion, werden mehr Scherenschrott(-qualitäten) und Stahlspäne eingesetzt. Steigen die Exportpreise für Scherenschrott dahingehend, wird weniger Schredderschrott produziert. Inputqualitäten, die eigentlich zur Verarbeitungsrouten des Schredders gehören (leichter Mischschrott und SVM), werden durch die Scherenproduktion abgewickelt. Diese Szenarien sind nicht abschließend oder bezeichnend und dienen allein der beispielhaften Darstellung von schredderrelevanten Marktfaktoren.

Das Kreisdiagramm des Statistischen Bundesamtes in Abbildung 12 zeigt die grobe Mengenverteilung an Schredderanlagen aus dem Jahre 2017 mit Restkarossen im Vormaterial. Der Einsatz von Fe- und Stahlschrott liegt im Mittel bei 73,9 %. In Hinblick auf die in Kapitel 11.3 geführten Untersuchungen zur Vormaterialentwicklung an Schreddern, können diese Zahlen standortspezifisch stark voneinander abweichen und werden hier lediglich als allgemeine Richtwerte angeführt.



**Abbildung 12: Prozentuale Verteilung der groben Inputströme an Schreddern in Deutschland 2017 [38]**

Die Gesamtmenge an verarbeiteten Schrotten in Autoschredderanlagen (3,70 Millionen t) verdeutlicht die Größe und damit verbundene Schwerfälligkeit des Industriezweigs in der Abfallwirtschaft Deutschlands.

Die volatilen Marktbedingungen widersprechen der Dynamik des massenleistungsfähigen Schredderprozesses. Langfristig ausgelegte Geschäftsstrategien fordern eine kurzfristige Flexibilisierung des Produktionsablaufs in Form von systematischen, marktabhängigen Mengen-, Einkaufspreis- und Sortenmixanpassungen in Materialinput. Für Großschredderanlagen mit monatlichen Produktionsmengen von E40 größer 15.000 t und einem eingeschränkten Zugang zum Exportgeschäft, sind die aktuellen Marktbedingungen kritisch.

Die Flexibilisierung des Schreddergeschäfts wird unter der Weiterentwicklung von Schredderanlage im Kontext der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 9.3) sowie der Vormaterial- und Produktentwicklung in Kapitel 11 vertieft.

## 4.2 Wirtschaftlichkeit von Schredderanlagen

In Rückkopplung mit den produktionsgeprägten Termini des Kapitel 3.1, liegt das Kernziel einer Schredderanlage primär in der ertragsreichen Verarbeitung von Gütern zu verwertbaren Produkten. Im übertragenen Sinne ist damit die Aufbereitung des Vormaterials zu marktfähigen Sorten oder Sortengruppen (Produktmix) gemeint und erfolgt idealer Weise unter wirtschaftlichen Bedingungen.

Die Wirtschaftlichkeit einer Schredderanlage kann über die klassische Ratio aus wertmäßigem Output (Ertrag) zu wertmäßigem Input (Aufwand) dargestellt werden, trifft aber in dieser rudimentären Form nicht den Ton der stoffstrombasierten Prozessbewertung und sagt wenig über die Rentabilität der Anlage aus. Neben der Quantifizierung und Qualifizierung der Warenbewegung im Schredderprozess, ergibt sich dessen Wirtschaftlichkeit aus den Größen

- Kapitalverzinsung,
- Marktdurchdringung und
- Wertschöpfung [39] [40].

Die Gesamtkapital- und die Umsatzrentabilität einer Schredderanlage verstehen sich als besonders wichtige Steuerungsgrößen der wirtschaftlichen Erfolgsrechnung an Schreddern. Im Kontext der Weiterentwicklung dieser, lässt sich die Kapitalverzinsung u.a. als Return on Investment (ROI) rechnen und besitzt maßgeblichen Einfluss auf Investitionsentscheidungen.

Finden die wirtschaftlich und produktiv erzeugten Güter oder Dienstleistungen keinen Markt, wirkt sich das negativ auf die Rentabilität der Anlage aus. Die fehlende Marktdurchdringung führt zu einem geringeren Absatz (siehe Segment 5 Kapitel 3.2). Als massenleistungsfähige Produktionseinheit mit großem Fixkostenanteil (kapitalintensiv), sind Schredderanlagen auf hohe Durchsatzmengen ausgelegt (Skaleneffekt). Ein fallender Absatz beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der Anlage folglich negativ [40] [41], da der Fixkostenanteil bei weniger Output nicht proportional ist.

Wertschöpfung selbst, wird an Schredderanlagen auf zwei Arten betrieben. Zum einen zeichnet sich die Wertschöpfung durch das Verhältnis aus Produktionskosten, Ein- und Verkaufstätigkeiten (Preisbildung) aus, zum anderen steckt die Wertschöpfung in der effektiven Wertstoffausbringung als Folge der Vormaterialzusammensetzung und der Aufbereitungstiefe [40]. Dieser Absatz schließt an die in Kapitel 3.3.1 gelieferte quantitative und qualitative Bewertung des Produktionsprozesses an und verdeutlicht, dass Durchsatz und Aufbereitung allein nicht ausreichen, um die Wirtschaftlichkeit einer Schredderanlage abzubilden. So fordert ein rentabler Schredderprozess grundsätzlich ein gesundes Verhältnis aus Ausbringung, Absatz und Preisbildung.

Wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff „Wirtschaftlichkeit“ in Verbindung mit dem Schredderprozess genannt, versteht sich die Wirtschaftlichkeit als der positive Effekt der genannten Bewertungsgrößen, wenn nicht anderweitig im Text vermerkt.

Die kaufmännische Betrachtung des Schredderprozesses zeigt, dass der Absatz einen wesentlichen Einfluss auf das Produktportfolio am Schredder nimmt. Dabei geht es nicht per se um die planerische Auslegung oder theoretische Produktionsbandbreite der Anlage, als vielmehr um die Entscheidung, wann welches Produkt zu welcher Menge aus dem bestehenden Portfolio heraus produziert wird. Und des Weiteren um die Festlegung, welches Vormaterial in welcher Qualität dafür benötigt wird.

Entgegen dem klassischen Produktionsbetrieb mit integrierter Fertigteilerzeugung, ist die Wettbewerbsfähigkeit einer Schredderanlage nur indirekt an die Marktakzeptanz seiner Produkte gekoppelt, da der Verkaufsfaktor in Zeiten volatiler Märkte wohl eher preis-, als qualitätsgesteuert ist [20]. Inwiefern sich dieser Status zukünftig ändern kann, wird in Kapitel 11, speziell 11.4 dieser Dissertation ausgeführt.

Monetär betrachtet, steht die veräußerte Sorte 4-Menge für die Produktionskostendeckung, einschließlich dem Verwertungskostenausgleich für die SLF. Damit haben über 80 % des Materialdurchsatzes an Großschreddern keinen direkten Ertragseffekt. In dieser quasi paretoeffizienten Verteilung ist die SSF mit einem Mengenanteil von weniger als 20 % für den Ertrag an der Schredderanlage ausschlaggebend. Eine prozentuale Abwertung der SSF ist folglich ertragsmindernd. Dahingegen setzt der Anstieg der SLF die Sorte 4 als entscheidende Deckungsbeitragsvariable unter Druck.

Die zunehmende Wertstoffberaubung des Vormaterials gepaart mit Unsicherheiten in der stofflichen Zusammensetzung vieler Fraktionen, bewegt Betreiber dazu absatzgesteuert

einzukaufen und das Vormaterial entsprechend zu konditionieren oder eine nachweisgeführte monochargierte Fahrweise vorzuziehen. Der Schredder schlägt schließlich den Weg von der durchsatzorientierten zur stoffstromgelenkten Produktion ein.

### **4.3 Produktionscontrolling an Schredderanlagen**

Die Bewertung und Lenkung der kaufmännischen Erfolgsfaktoren ist ein wesentlicher Bestandteil der Unternehmensführung, auch in Großschredderbetrieben. Der Produktionslastigkeit geschuldet, lässt sich der Schredderprozess nicht allein durch kaufmännische Zahlen lenken und bedarf einer gesamtheitlichen Verbindung aus Maschinen-, Betriebs- und Vertriebskennzahlen.

Für eine wirtschaftliche Steuerung und Weiterentwicklung einer Schredderanlage ist essenziell zu verstehen, wie sich die betriebswirtschaftlichen Zusammenhänge im Betrieb verhalten und welchen Beitrag Produkte, Aufbereitungsverfahren und -prozesse dazu leisten. Es besteht die Notwendigkeit die Wettbewerbsfähigkeit im Markt zu überwachen und die Produktion in einer deckungsbeitragsmaximierenden Bahn zu lenken. Das Produktionscontrolling übernimmt diese Aufgaben [41].

Ziel des Controllings für Schredderanlagen ist neben der erfolgreichen Betriebsführung, nachhaltige Investitionsentscheidungen im Sinne der standortübergreifenden Optimierung zu treffen und eine Linie zwischen produktionsrelevanten und kaufmännischen Entscheidungen zu finden. Speziell das für den gegenwärtigen Anwendungsfall relevante Produktionscontrolling, legt die idealen Produktionsparameter für das erzeugte Produkt fest [41]. In ihm werden die Ziele der Produktion und des Controllings zusammengeführt.

Eine Reihe von Werkzeugen, wie Rechercheverfahren, Technologieportfolio- oder Nutzwertanalysen helfen neben der klassischen Betrachtung von Kennzahlen und Kosteninformationen, strategische Entscheidungen zu bewerten.

Die den Unternehmenswert eines Recyclingbetriebes beeinflussenden Faktoren und Investitionsentscheidungen sind bei Weitem zu komplex, als dass sie im Rahmen dieser Arbeit in ihrer Gänze sinnvoll bearbeitet werden können [42].

Die Abbildung des Schredderproduktionsprozesses erfolgt im Controlling i.d.R. über absolute und relative Kennzahlen als Teil eines mehrstufigen Kennzahlensystems [41] [40].

In Form von quantitativ erfassten sowie aggregierten Daten zeigen Kennzahlen realitätsnah betriebswirtschaftlich relevante Sachverhalte auf. Ziel ihrer Verwendung ist eine verein-

fachte Darstellung komplexer Gegebenheiten unter der Bedingung einer transparenten Abbildung der Wirklichkeit [43] [44]. Kennzahlensysteme wiederum werden dafür herangezogen, die Beziehung und Wechselwirkung von singulären Kennzahlen multikausal aufzuzeigen [41].

Die Auslegung des produktionsrelevanten Kennzahlensystems am Schredder ist wertstromorientiert [44]. Im Wertstrom erfolgt die Abbildung des Wertschöpfungsprozesses über Leistungskennzahlen, sogenannte „Key Performance Indicators“ (KPIs) [41]. Durch die systematische Verknüpfung von monetären und nicht-monetären Größen, lässt sich der Schredderprozess entsprechend leistungsbezogen und zielorientiert darstellen. Die Festlegung und Verwendung von KPIs orientiert sich in dieser Arbeit u.a. an dem VDMA Einheitsblatt 66412-1 für die strukturelle Sammlung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen in Produktionssystemen.

### **4.3.1 Kosten und Leistungsrechnung an Schredderanlagen**

Die Kosten- und Leistungsrechnung bildet die Basis der prozessgerechten Planung und Steuerung von Schredderanlagen [20] und deckt sich mit der Produktionssegmentierung aus Kapitel 3.2 insofern, dass die Kostenerzeugung/-verantwortung auf die Funktionsebene der Produktionseinheiten heruntergebrochen wird (Cost-Center-Ansatz) [22]. Weil wertstromorientiert, lassen sich die Kosten für den Materialfluss und den Produktionsprozess von Schreddern ressourcen- und zeitgebunden ermitteln [44].

Dieser Ansatz verlangt im Grunde nach einem modernen prozessorientierten Kostenrechnungssystem. Die Prozesskostenrechnung (auch Vorgangskalkulation), ist Teil der Vollkostenrechnung und setzt bei der Verteilung der Gemeinkosten auf das Verursacherprinzip. Entgegen der verursachungsgerechten Prozesskostenrechnung verfolgt die Vollkostenkalkulation eine Verteilung der Unternehmenskosten mittels Kostenstellen auf Kostenträger [45]. Damit wird für jede relevante Produktionseinheit am Schredder der Ressourcenverbrauch ermittelt (variable und fixe Kosten) und mit entsprechenden Kostensätzen auf den Gesamtprozess umgelegt. Die Gemeinkosten werden auf Basis der Einzelkosten ausgelegt, wobei die Fixkostenproportionalisierung durch die Produktivität der Anlage beeinflusst wird.

Eine nichtverursachungsgerechte Kostenumlage kann bei Einrichtungen mit hohen Gemeinkosten zu Fehlern in der absatzgerichteten Preisbildung führen. Diese können kurz- und langfristig den Erfolg strategischer und operativer Entscheidungen gefährden [19] [44] [40]. Die maschinenunabhängigen Gemeinkosten an Schredderanlagen sind in Form von

bspw. Löhnen in der Verwaltung oder Mietkosten für Sozialgebäude, verhältnismäßig niedrig. Des Weiteren werden in den meisten Schredderbetrieben funktionale Kostenstrukturen gelebt, die nicht dem Detaillierungsgrad einer prozessgerechten Kostensystematik entsprechen. Die Zuordnung der Gemeinkosten nach der tatsächlichen Inanspruchnahme ist damit vergleichsweise schwierig.

Kapitel 8.3 dieser Arbeit liefert einen möglichen Ansatz die Vollkostenrechnung an Schredderanlagen prozesstechnisch auszurichten, ohne die buchhalterischen Bestandstrukturen im Betrieb zu reorganisieren. Teile des Schredderprozesses werden im Rahmen dieser Vollkostenrechnung verursachungsgerecht gewichtet. Die Verwendung des Begriffes „Prozesskosten“ versteht sich im Zuge dessen und für den weiteren Verlauf dieser Arbeit, als eine möglichst vorgangsgerichtete Verteilung der Einzel- und Gemeinkosten auf den Schredderprozess auf Basis der Vollkostenkalkulation.

Die Zahlengrundlage der kostentreibergerechten Kostenermittlung und -zuordnung, bildet der Betriebsabrechnungsbogen (BAB) [44].

Aus der prozessorientierten Kostenrechnung heraus lassen sich die wesentlichen Zielgrößen zur Bewertung von Anlagen- und Produktionsprozessen ableiten. Die für den Schredder relevanten monetären und nicht-monetären Zielgrößen zur Leistungsevaluation sind

- Kosten,
- Kapazitäten,
- Auslastung bzw. Verfügbarkeit,
- Flexibilität,
- Effektivität und Produktivität [41].

Die genannten Größen sind auf ein gemeinsames Ziel ausgerichtet: die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit in der Produktion und der dazugehörigen Prozesse [41]. Kosten haben in dieser Gleichung den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Schredderanlage und werden im Kapitel 8.3.1.1 als das Grundgerüst des Controllingtools ausgelegt.

### **4.3.2 Nicht-monetäre Kennzahlen**

Die Schredderanlage trägt dem Unternehmenserfolgsziel vornehmlich durch die Menge an erzeugten Produkten bei. Die Erzeugung von Schrotten in einer definierten Menge, Art und Qualität über einen geplanten Zeitraum hinweg [20], wird unter dem Gesichtspunkt der An-



lageneffektivität erfasst. Die Umsetzung dieser Ziele unter der Erfüllung des Minimalprinzips, sprich der Ressourcenschonung, wird als Anlageneffizienz bzw. Produktivität festgelegt [46]. Mit den bereits genannten Zielgrößen aus Kapitel 4.3.1 bilden die Effektivität und die Produktivität, mit Ausnahme der Kosten, die grundlegenden nicht-monetären Leistungsgrößen im Schredderprozesses ab.

Neben der effizienten Abstimmung und verfahrenstechnischen Auslegung der Produktionseinheiten im Schredderprozess, werden die Kapazitätsgrenzen der Anlage maßgeblich von der installierten Antriebsleistung des Schredders bestimmt. Kapazitätsengpässe entstehen folglich dort, wo die Verfügbarkeit der Anlage durch Ausfälle in den vor- oder nachgelagerten Produktionseinheiten eingeschränkt ist. Die volle Auslastung der Anlage ist bei Kapazitätsengpässen in Form von planmäßigen und unplanmäßigen Ausfällen nicht gegeben. Bei kapitalintensiven Anlagen, wie Großschreddern, steht die Auslastung der Anlage auf Grund der Stückkostensensibilität an oberster Stelle. Die Erhöhung der Auslastung führt dabei nur zu einem erhöhten Umsatz, wenn der Absatz der gefertigten Produkte am Schredder sichergestellt ist. Erst dann können die Prozesskosten durch die Menge aller Erzeugnisse gedeckt werden. Die starre Auslegung von Großschreddern auf hohe Durchsatzleistungen und die bereits genannten volatilen Markgrößen, schränken die Planungssicherheit für Produktionsmengen an Schredderanlagen zunehmend ein. Die Auslastung wird maßgeblich von der nachgefragten Menge am Markt bestimmt. Die Forderung nach einer gezielten Kundenorientierung bei der Produktgestaltung fordert dementsprechend eine zunehmende Flexibilisierung des Fertigungsprozesses am Schredder [20] [41].

Die Messung der genannten Zielgrößen im laufenden Schredderprozess ist essentiell, um Defizite und Entwicklungspotentiale des Systems als Teil der Anlagenproduktivität kennzahlenbasiert auszuwerten. Die Gesamtanlageneffektivität bzw. Overall Equipment Effectiveness (OEE) ist eine ressourcenbasierte Kennzahl, mit Hilfe derer die erreichte Ausbringung einer Anlage, der Zielausbringung im definierten Zeitraum entgegengestellt wird. Ressourcenbasiert meint in diesem Zusammenhang primär die Parameter Kosten, Zeit und Menge. In der OEE werden alle Verlustbereiche der Produktion in Form der Verfügbarkeit, Leistung und Qualität vereint. Für den Anwendungsfall dieser Arbeit setzt sie sich damit kalkulatorisch aus drei Teilkennzahlen zusammen: dem Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsgrad bzw. -faktor. Die Verfügbarkeit der Schredderanlage lässt sich über die Summe der auftretenden Stillstandszeiten, das Leistungsspektrum über den Reduktionsgrad der Ausbringung in einem betrachteten Zeitraum, definieren. Der Qualitätsfaktor findet

im klassischen Ansatz der OEE, in der Anzahl der produzierten Ausschussmengen Anwendung [41] [47].

### 4.3.3 Betriebsdaten an Schredderanlagen

Aus der Summe monetärer- und nicht-monetärer Kennzahlen lassen sich u.a. in Verbindung mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Maschinendaten, prozessimmanente Betriebskennzahlen generieren.

**Tabelle 2: Auszug typischer Betriebsdaten eines Schredderprozesses**

Betriebsdaten	Einheit
(Soll-)Schichtzeit	[h]
(Ist-)Betriebszeit	[h]
Produktionszeit	[h]
Stillstandzeit (geplant, ungeplant, Gesamt)	[h]
Stillstandsgrund	(manuell)
Verfügbarkeitsfaktor	[%]
Leistungsfaktor	[%]
OEE	[%]
Inputsorte (AVV-Nr. und/oder Katalog)	(manuell)
Produktionsmenge/Outputtonnage sortenbasiert (Fe/SLF/SSF)	[t]
Produktionsmenge Gesamt	[t]
Produktionsleistung als Durchsatz bzw. Menge je Produktionsstunde sortenbasiert (Fe/SLF/SSF)	[t/h]
Durchsatz Gesamt	[t/h]
Durchsatz/Menge je Betriebsstunde	[t/h]
Einkaufspreis Input sorten- oder kundenbasiert	[€/t]
Kosten Einkauf sortenbasiert	[€]
Verkaufspreis sorten- oder kundenbasiert (Fe/SLF/SSF)	[€/t]
Einnahmen sorten- oder kundenbasiert (Fe/SLF/SSF)	[€/t]
Kosten Fremdpersonal je Produktionseinheit	[€]
Kosten fix und variabel je Produktionseinheit	[€]
Kosten Produktion Gesamt	[€]
Kosten je Produktionsstunde	[€/t]
Kosten je Betriebsstunde	[€/t]
Kosten je Tonne Input	[€/t]
Ertragsrechnung	[€/t]

Die in Tabelle 2 ausgeführten Betriebsdaten decken den groben Rahmen relevanter Leistungskennzahlen an Schredderanlagen ab und werden in Kapitel 8.3.1 ff. prozess- und kostenspezifische hergeleitet.

Die gelisteten Betriebs- und Produktionskenngößen sind ein entscheidender Indikator für die Erfolgsrechnung am Schredder. Sie bilden die Datengrundlage für die in dieser Dissertation geführte Bewertung von Weiterentwicklungsschritten an Schredderanlagen. Die stoffstrom-, bzw. inhalts- oder ausbringungsbasierte Evaluation des Produktionsprozesses ist ein entscheidender Punkt in der Flexibilisierung von Aufbereitungsschritten weg von einer rein durchsatzorientierten Produktion.

## **5 Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen**

Die Einführungskapitel 2 bis 4 aus den Bereichen Umweltrecht, Technik und Wirtschaft verdeutlichen, wie interdisziplinär eine systemische Betrachtung von Schredderanlagen anzugehen ist. Diese Vielschichtigkeit gilt es im Rahmen der vorliegenden Arbeit strukturell zu ordnen und systemtechnisch über einen Top-Down-Ansatz in den Kontext der Problemstellung zu bringen. Die folgende Systemkonzeptionierung ist ein Modellansatz, über den sich die Systemanalyse, die Formalisierung und die Teilimplementierung der im Rahmen einer dreijährigen Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse, abbilden lassen [48].

### **5.1 Sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen**

Die sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen, sind ein systemtheoretischer Ansatz, um die wesentlichen Einflussgeber dieser Branche in einem Kreislaufsystem zu vereinen. Das System stellt die Verbindung zwischen den gesetzlichen Herausforderungen und den strategischen Managemententscheidungen der Betreiber im Kontext einer Anlagenneuplanung dar [24]. Der Ansatz verfolgt demnach die Theorie, dass die überarbeiteten Emissionsgrenzwertbestimmungen des BREF und der TA Luft für Schredderanlagen, direkten oder indirekten Einfluss auf die technischen und betrieblichen Bestandsprozesse nehmen. Er begründet darüber hinaus, dass die aktuelle Bewegung im Umweltrecht einen übergeordneten Einfluss auf den Fortbestand der industriellen Großschredder in Deutschland hat. Die Analyse der einzelnen Einflussfaktoren erfolgt in dieser Arbeit in Bezug auf rechtliche, technische und wirtschaftliche Ausprägungen und deckt sich mit den gelieferten Fachbereichen der Einführungskapitel. Das nachfolgende Konstrukt soll zukünftig als Grundlage für Planungs- und Investitionsentscheidungen der Betreiber von Autoschreddern zur Fe- und Metallschrottverarbeitung herangezogen werden [24].



**Abbildung 13: Die sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen [24]**

Die in Abbildung 13 dargestellten korrelierenden Säulen formen die sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Großschreddern in Deutschland. Die erste Einflussgröße findet sich in dem Zusammenwirken der europäischen und nationalen Gesetzgebung. Die Novellierung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Umweltschutz wirkt sich gemäß der in Kapitel 2.3 genannten Umsetzungsfristen, direkt auf den Fortbestand der entsprechenden IED-Anlagen aus. Die Altanlagengenehmigung bildet in dem Zusammenhang den zweiten Kerneinflussfaktor. Die im Genehmigungsbescheid hinterlegten emissions-technischen Betriebsgrenzen sind mit den neuen rechtlichen Emissionsgrenzwerten abzugleichen und indizieren infolgedessen, ob ein Eingriff in die Bestandstechnik in Form einer verfahrenstechnischen oder betrieblichen Maßnahme erforderlich ist.

Die Verifikation der geforderten Grenzwertbestimmungen am Schredder wird durch die dritte Säule abgebildet. Emissionsgrenzwerte und Messungen funktionieren im Laufe des Schredderbetriebes als regelmäßige Nachweisführung der festgelegten Emissionsschwellen gegenüber den Behördenvertretern und Kontrollinstanz der einzelnen Produktionseinheiten. Neben der eigentlichen Überwachung, verfolgt dieser Kerneinflussfaktor auch einen entwicklungstechnischen Ansatz. Liegen die gemessenen Grenzwerte nachweislich und

unter normalen Betriebsbedingungen über den genehmigten Emissionsgrenzen, kann der Betreiber noch vor dem Inkrafttreten einer Novelle, in die Ursachenforschung und Lösungsfindung einsteigen. Die Schredderbestandstechnik wird im Zuge des genannten Prozesses zum eigentlichen Gegenstand der Untersuchung. Der Stand der verbauten Technik ergänzt das Systemkonzept damit um die vierte Kerneinflussgröße. Aus emissionsrechtlicher Sicht, stellt die Säule 4 den entwicklungstechnischen Flaschenhals im System dar. Die Weiterentwicklung von Abluftnachbehandlungssystemen oder ähnlicher Technik zur Reduzierung der Emissionen an abgeschriebenen Großschreddern, bietet im Verhältnis zu der Erweiterung von wertschöpfungsorientierten PST, keine oder nur geringe monetäre Anreize. Aus dieser Prämisse heraus, ist der emissionstechnische Fortentwicklungsgedanke an solch produktionslastigen Industrieanlagen eher gesetzlich oder behördengetrieben. Operiert der Schredder unabhängig der prognostizierten Änderungen auf Gesetzesebene außerhalb der zulässigen Emissionsgrenzen oder fordert die Behörde eine Verbesserung der Werte, steht der Betreiber vor einer risikobehafteten Investitionsentscheidung. Die Entscheidung findet sich im Übergangsprozess von der Säule 4 zur Säule 5. Der Prozess ist insofern stark risikoprägend, dass der Eingriff in die Bestandstechnik zum einen als wesentliche Änderung genehmigungstechnische Konsequenzen in einem unbestimmten Ausmaß mit sich bringen kann und zum anderen durch volatile Marktszenarien geprägt ist. Welcher monetäre Aufwand in der Erfüllung der genehmigungsrechtlichen sowie gesetzlichen Forderungen steckt und welche Chancen sich in der fünften Kerneinflussgröße, den Schreddertechnologien und Innovationen, verbergen, wird zur Kernfrage des gegenwärtigen Systemkonzepts. Die Innovationen in Säule 5 sind neben den genannten gesetzlichen Einflussfaktoren direkt oder indirekt von externen Marktbegleitern, Anlagenherstellern, Forschungseinrichtungen und/oder durch den internen Entwicklungsgedanken des betroffenen Schredderbetriebes initiiert [24].

Das dargestellte Kreislaufsystem wird durch den sechsten Kerneinflussfaktor, die Umwelt- und Genehmigungsbehörden, erweitert. Unter Einbindung der gelieferten Erkenntnisse aus Kapitel 2.5 wird deutlich, dass jede Form der Anlagenverbesserung einer Freigabe der Behörden bedarf. Die staatliche Instanz trägt maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung der Säule 5 bei und schließt den Kreislauf, der in Folge des gesetzlichen Überarbeitungszyklus von vorn beginnt. Damit ist das Systemkonzept ein kontinuierlicher Prozess, der sich aus emissionstechnischen sowie ökonomischen Gesichtspunkten heraus, um den letzten Kerneinflussfaktor positioniert.

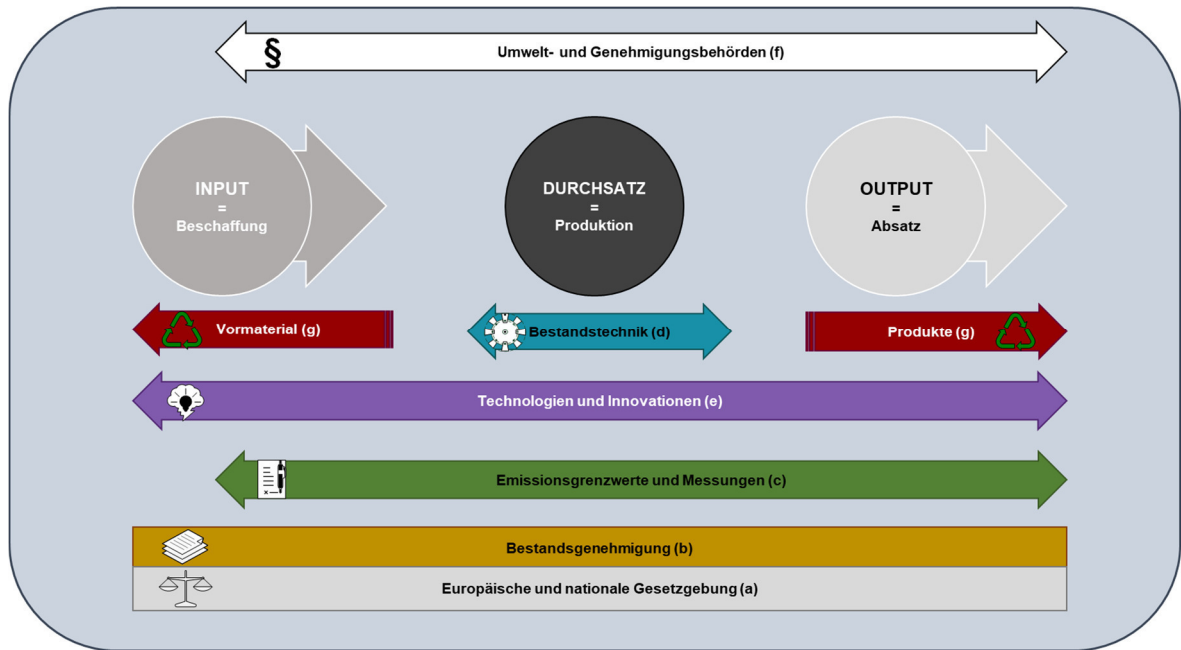
Die verfahrenstechnische Auslegung des Schredders ist an die in Kapitel 4 aufgeführten Prozess- und Leistungsgrößen gebunden. Infolgedessen und unter Einbindung der emissi-

onsrechtlichen Forderungen ist es notwendig, den Wirkungsgrad des Schreddervormaterials emissionstechnisch zu berücksichtigen. Aus prozesstechnischer Sicht besteht eine klare Verbindung zwischen der Zusammensetzung des produzierten bzw. aufbereiteten Input und dem Wertstoffpotential im Output. Welchen Effekt das verarbeitete Vormaterial auf die Luftemissionen hat und ob eine weitere schadstoffrelevante Verkettung mit steigenden Schredderrückständen im Vormaterial existiert, wird als Kernfrage der Säule 7 in den Kapiteln 7 und 11 diskutiert.

Der verwendete Ansatz zeigt, dass der Einflussbereich umweltrechtlicher Änderungen sowohl verfahrenstechnische Aspekte, als auch die langfristige strategische Ausrichtung des Schredderbetriebes anspricht. Die Unterkapitel 5.2 und 5.3 stellen das methodische Vorgehen bei der Ausarbeitung der sieben Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen dar und helfen dem weiteren Verlauf der Argumentationskette in der Dissertationsschrift zu folgen.

## **5.2 Methodik: Prozessmanagement als systemisches Vorgehen**

Bezugnehmend auf die Ausführungen in Kapitel 3.2 lässt sich die Verarbeitung des Vormaterials am Schredder in einer simplifizierten Verfahrensbetrachtung als lineare Prozesskette darstellen: Input, Durchsatz (Prozess), Output. Die Reduzierung des Schredderprozesses auf die Produktion gekoppelt an ihre Ein- und Ausgangswerte, ermöglicht eine störungsfreie Analyse des Produktionsprozesses. Ziel ist die einzelnen Kerneinflussfaktoren systematisch im Schredderprozess zu lokalisieren und auf ihre Funktionsbereiche anzuwenden. Abbildung 14 beschreibt den angeführten Wertschöpfungsverlauf am Schredder in der vereinfachten Prinzipskizze und unterstützt bei der Zuordnung der sieben Säulen.



**Abbildung 14: Die sieben Kerneinflussfaktoren in der Wertschöpfungskette des Schredders**

Aus dem Blickwinkel eines rein systemischen Konstrukts, besitzt der Schredderprozess eine geradlinige Struktur, folgt einer Logik und bindet in dessen entsprechende Ressourcen. Die Ressourcen wiederum definieren sich über Parameter, welche Daten generieren, die in Form von Kennzahlen zu weiteren Informationen verarbeitet werden können. Legt man das in Abbildung 13 aufgezeigte Kreislaufmodell auf die hier betrachtete Prozesskette um, kann eine Zuordnung der Einflussfaktoren auf linearer Ebene erfolgen. So sind die rechtlichen Rahmenbedingungen (a) aus der ersten Säule in allen drei Teilschritten des Produktionsprozesses verankert. Die Genehmigungslage (b) bildet an dieser Stelle das Fundament der Unternehmung. Die Emissions- und Immissionsmessung (c) beschränkt sich ebenfalls nicht nur auf die Produktion, sondern greift bereits in den vor- und nachgelagerten Schnittstellen der Produktion. Die Bestandstechnik (d) grenzt sich im Wesentlichen auf die betrieblichen Funktionen des Prozesses ein (siehe auch Abbildung 1), wohingegen das Thema Schredderneuplanung und Innovationen (e) in allen Bereichen der Wertstoffkette greift und entsprechend seiner Einflussbereiche zu untersuchen ist. Die Umwelt- und Genehmigungsbehörden (f) limitieren das System gewissermaßen in seiner Gesamtheit, haben aber vorrangig Einfluss auf den Bereich innerhalb der betrieblichen Systemgrenzen, sprich zwischen der Annahme im Wareneingang und dem Absatz. Sie sind dem Produktionssystem gewissermaßen übergeordnet. Das Vormaterial und die Produkte (g) durchlaufen die bzw. sind Erzeugnis der kompletten Wertschöpfungskette, sodass die Einflussfaktoren der siebten Säule in allen Stationen des Schredderprozesses gegenwärtig und folglich in dieser Arbeit zu analysieren und diskutieren sind.



### **5.3 Ergebnisbewertung: Risikomanagement als Weg zur Entscheidungsfindung**

In der Entscheidungsfrage zur Planung einer Großschredderanlage ist zu beantworten, welche Erfolgsfaktoren des gegenwärtigen Produktionssystems zukünftig unter den neuen umweltrechtlichen Randbedingungen noch Bestand haben und welcher monetäre Aufwand in der Erfüllung dieser steckt? Begünstigen die Investitions- und Betriebskosten einer zukunftsweisenden Produktionsstätte im Schreddersegment den ROI? Unter welchen marktgetriebenen Einflussfaktoren besteht der Recyclingbetrieb in den kommenden zehn bis 15 Jahren, auch in Bezug auf die sich ändernde stoffliche Zusammensetzung des Inputstroms?

Die Datenerhebung und Auswertung im beschriebenen Wertstrommodell ist ein Weg, das unternehmerische Planungsrisiko kalkulatorisch abzubilden. Eine Kennzahlenauswertung am Schredder, die sowohl technische, produktionsrelevante, kaufmännische und umweltrechtliche Parameter einschließt, bildet die Grundlage einer systematischen Entscheidungsfindung und kann innovative Entwicklungsprozesse lenken sowie bewerten [24] [49]. So verfolgt der übergeordnete Methodenansatz in dieser Phase der Dissertationsschrift eine Zusammenführung der gewonnenen Erkenntnisse aus den Bereichen Umweltrecht (Kapitel 2, 6 und 7), Technik (Kapitel 3 und 8) und Warenwirtschaft (Kapitel 4 und 8) in einem validen, bewertbaren Schredderkonzept (Kapitel 9 und 10).

Kapitel 11 wird zum Ausblick auf die zukünftigen Rahmenbedingungen im Stoffstrommanagement an Schreddern. Es bewertet schlussendlich die Nachhaltigkeit der Konzeptstudie im Kontext komplexer Inhaltsstoffe und Qualitätsanforderungen im Absatz.

## 6 Neue umweltschutzrechtliche Anforderungen für Schredderanlagen

Gegenstand dieses Kapitels ist die Auswertung der neuen umweltschutzrechtlichen Rahmenbedingungen für Großschredderanlagen auf europäischer und nationaler Ebene im Schwerpunktfach Luftreinhaltung. In der vorliegenden Analyse werden solche betrieblichen und messtechnischen Aufgaben selektiert und beschrieben, die sich aus den gesetzlichen Vorgaben für genehmigungsbedürftige Anlagen im besagten Wirtschaftszweig ergeben und Betreiber von Schredderanlagen u.a. vor existenzielle Herausforderungen stellen.

### 6.1 Säule 1: Europäische und nationale Gesetzgebung

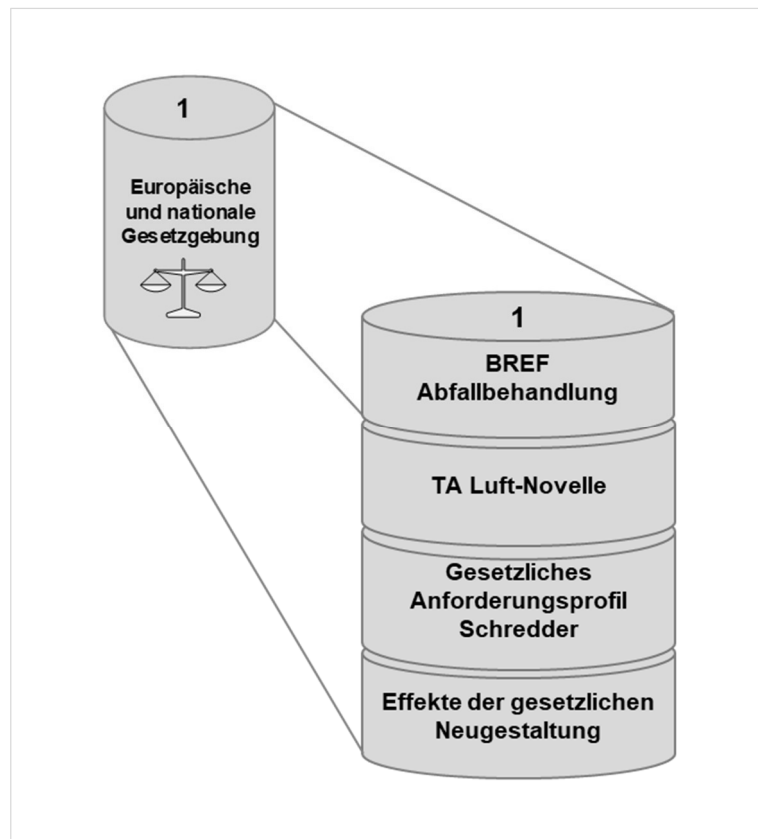


Abbildung 15: Säule 1: wesentliche Systembausteine in der Interpretation des Umweltrechts

Entsprechend dem übergeordneten Kreislaufmodell dieser Arbeit aus Abbildung 13, orientiert sich die Untersuchung des neuen rechtlichen Rahmens an den Ausgangsparametern des Kapitels 2 und wird über die Säule 1 in Abbildung 15 abgebildet. Der formalrechtlichen Gesetzeshierarchie folgend, steht die Analyse des BREF für Abfallbehandlungsanlagen in

diesem Kapitel vor der Auswertung der TA Luft-Novelle. Abbildung 15 verdeutlicht die übergeordnete Stellung entsprechend. Da die Anforderungen an eine Anlagenüberwachung, die sich aus den Regelungen der EU ergeben, für den nationalen Vollzug immer wichtiger werden, steht der TA Luft-Novelle, trotz der niederen Hierarchieebene, eine besondere Gewichtung im Entwicklungsprozess von Schredderanlagen zu [16].

Die Erkenntnisse der Einzeluntersuchungen werden in einem gemeinsamen Anforderungsprofil für Schredderanlagen des Metall- und Schrottreyclings zusammengeführt und durch die Herausforderungen in der Bestandstechnik (Kapitel 8) ergänzt. In Kombination mit der Säule 2 des Systemkonzepts, lassen sich die Effekte der gesetzlichen Neuregelungen auf den Genehmigungsstand, rudimentär beleuchten.

## **6.2 Novelle des BREF für Abfallbehandlungsanlagen aus 2018**

Rückwirkend lässt sich die Überarbeitung des BREF für Abfallbehandlungsanlagen aus dem Jahre 2005 über einen Zeitraum von sechs Jahren darstellen. Die Herangehensweise bei der Ausarbeitung des neuen BVT-Merkblatts aus dem Jahre 2018 lehnt an den bereits in Kapitel 2.2.1 genannten Durchführungsbeschluss an. In Kapitel 4.6 des Beschlusses wird der formelle Arbeitsprozess zur Novellierung von BVT-Merkblättern beschrieben und in Anlage 2 strukturell in Form eines typischen Arbeitsablaufs für die Ausarbeitung und Überprüfung dieser, dargestellt. Das gegenwärtige BVT-Merkblatt ist das Ergebnis des Informationsaustausches seit der Auftaktsitzung der TWG vom 25. bis 28. November 2013. Die Zusammenstellung, der Austausch und die Analyse aller relevanten Überarbeitungswünsche, findet sich unter Hervorhebung der neuen Informationen und vorgenommenen Änderungen, historisch und in Form einer konsolidierenden Fassung, in den Jahren 2014 und 2015 wieder. Die BVT-Schlussfolgerungen für Abfallbehandlungsanlagen gründen auf der Abschlussitzung der TWG vom 19. bis 23. März 2017. Durch die Veröffentlichung der endgültigen Entwurfsfassung des BVT-Merkblatts am 19. Oktober 2017 und die Annahme der Beschlüsse über die BVT-Schlussfolgerungen im Rahmen des mit Artikel 75 Absatz 1 der IED eingesetzten EU-Ausschusses, ist die Novellierung des BREF für Abfallbehandlungsanlagen am 12. April 2018 offiziell abgeschlossen worden. Die im zweiten Halbjahr 2018 übersetzten und im EU-Amtsblatt veröffentlichten BVT-Schlussfolgerungen sind damit seit dem 17. August 2018 rechtsgültig und mit einer Umsetzungsfrist von vier Jahren auf nationaler Rechtsebene einzubetten. Die erneute Überarbeitung des hier diskutierten BVT-Merkblatts und seiner Schlussfolgerungen ist für das Jahr 2024 prognostiziert.

Kontextbezogen konzentriert sich die folgende Untersuchung des BVT-Merkblatts für Abfallbehandlungsanlagen auf die Kernpunkte, welche wesentliche Auswirkungen auf den Betrieb und die Weiterentwicklung von Schredderanlagen haben. In Anbetracht der aktuellen Verschärfung emissionsrechtlicher Randbedingungen und der daraus resultierenden Herausforderungen im Bereich der Verfahrens- und Betriebstechnik, steht das Thema Luftreinhaltung darüber hinaus im Fokus der Untersuchung.

Entgegen der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Struktur, ist das diskutierte BVT-Merkblatt nicht in sieben, sondern acht Kernkapitel aufgeteilt. Grund dafür ist die verfahrenstechnische Differenzierung der Abfallbehandlung in drei Kernbereiche: die mechanische, die biologische und die chemisch-physikalische Behandlung von Abfällen (siehe Tabelle 3). Emissionswerte, Leistungsdaten und Verfahrenslösungen werden in dieser Form nicht prozessübergreifend für eine Branche in zwei aufeinanderfolgenden Kapiteln formuliert, sondern auf Grund ihrer Komplexität, anteilig auf drei unterschiedlichen Behandlungswegen heruntergebrochen. Durch diesen Aufbau erhalten Schredderanlagen zur mechanischen Verarbeitung von Schrott- und Metallfraktionen erstmals spezifizierten Einzug in das BVT-Merkblatt. Dieser Umstand ist u.a. eine Folgenerscheinung aus der engen Verbindung zur IED und sorgt dafür, dass die Anforderungen an die Betriebsführung nun festgeschrieben und wesentlich umfangreicher sind, wie sich im Laufe des Kapitels zeigt.

**Tabelle 3: Kernkapitel des BREF für Abfallbehandlungsanlagen vom 17. August 2018**

Kapitel	Inhalt	Seite
1	Allgemeine Informationen	1
2	Allgemein angewandte Prozesse und Techniken bei der Abfallbehandlung	31
3	Mechanische Abfallbehandlung	235
4	Biologische Abfallbehandlung	325
5	Chemisch-Physikalische Abfallbehandlung	423
6	BVT-Schlussfolgerungen für die Abfallbehandlung	711
7	Techniken in der Entwicklung	767
8	Schlussbemerkungen	779

Neben dem Kernkapitel 3 über die mechanische Behandlung von Abfällen, kommt den unter Kapitel 6.2 gelisteten Schlussfolgerungen in Bezug auf Großschredderanlagen, besondere Bedeutung zu. Sie werden in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.13 dieser Arbeit unter dem Schwerpunkt emissionsrechtlicher Anforderungen gesondert behandelt. Auf Grund der geringen Detailtiefe, sind die anwendungsspezifisch relevanten Informationen aus dem Kapitel 1 des BVT-Merkblatts lediglich im Anhang A als Orientierungshilfe aufgelistet. Die Tabellen im Anhang A funktionieren wie eine Bewertungsmatrix. Grün gelistete Kapitel sind

für den Sachverhalt dieser Arbeit von besonderer Bedeutung. Sie nehmen direkten Einfluss auf das zukünftige Schredderdesign, sprich die technische Auslegung der Anlage unter Einbindung der umweltschutzrechtlichen Herausforderungen. Gelb und rot gelistete Abschnitte vervollständigen die betriebstechnischen Parameter für die Genehmigung, den Betrieb, die Erweiterung und die Stilllegung eines Großschredders. Die gelb markierten Kapitel stehen in dem Zusammenhang für das klassische Management eines Entsorgungsbetriebes und bedürfen teilweise keiner weiteren Detailerläuterung. Die roten Abschnitte stellen unwesentliche oder kritische Randbedingungen in der Betriebsführung dar, sprengen auf Grund ihres Schwerpunktgebietes (bspw. Abwasserbehandlung und -aufbereitung sowie Lärm) aber den Rahmen dieser Ausarbeitung.

Die Summe der im Anhang A gelisteten Kapitel und ihrer BVT bilden den neuen gesetzlichen Rahmen für Großschredderanlagen auf europäischer Ebene. Er ist die Mindestanforderungen für den Betrieb eines Schredders im Wirkungsbereich der EU. Die in Kapitel 6 des Merkblatts aufgeführten BVT 1 bis 28 fassen die Betriebs- und Genehmigungsaufgaben von Großschreddern in einem geschlossenen Referenzdokument zusammen. Als Durchführungsbeschluss der EU-Kommission sind sie die eigentliche Herausforderung für die Anlagenbetreiber und damit für die Definition des neuen Schredderprofils von besonderer Bedeutung. Der Anwendungsbereich der Schlussfolgerungen findet über die IED für solche Tätigkeiten Geltung, die die Behandlung von metallischen Abfällen unter Berücksichtigung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten sowie von Altfahrzeugen und ihren Bestandteilen in Schredderanlagen, einschließen.

### **6.2.1 BVT 1: Umweltmanagementsystem**

Durch die Einführung und Anwendung eines UMS werden organisatorische und betriebliche Prozessparameter zur Verbesserung der allgemeinen Umweltleistung eines Schredderbetriebes geschaffen. Das UMS verfolgt dabei den Ansatz eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Es ermöglicht Betreibern von IED-Anlagen Umweltprobleme systematisch und nachweisbar zu adressieren. Forderungen nach Umweltstrategien als Teil der Unternehmenskultur und in Form einer technologisch nachhaltigen Investitionsplanung, sind ebenso gefordert, wie die klassischen Dokumentationspflichten, Instandhaltungsprogramme, Sicherheitskonzepte und Leistungskontrollen in Form von verschiedensten emissionstechnischen Messungen (u.a. Staub, Lärm, Geruch etc.). Ergänzt durch die BVT 2 zum Abfall- und Stoffstrommanagement und die BVT 3 über die Einführung eines Emissionsquellenverzeichnis, überschreitet das UMS den regulären verwaltungstechnischen

Aufwand des heutigen Entsorgungsfachbetriebes im Metall- und Schrottreycling. Lauf BVT 1 werden die Art und der Anwendungsbereich des UMS individuell durch die Form und die Komplexität der Anlage sowie das Ausmaß ihrer potenziellen Umweltauswirkungen bestimmt. Der Umfang des UMS ist damit maßgeblich abhängig von der Zusammensetzung und Menge der behandelten Abfälle. Für Schredderanlagen bedeutet der neue Rahmen eine Erweiterung der üblichen zertifizierten Managementsysteme durch die Akkreditierung gemäß ISO 14001 oder eine erweiterte Kombination bestehender Qualitätsmanagementsysteme mit der EfbV [13].

### **6.2.2 BVT 2: Verbesserung der Umweltleistungen**

Die BVT 2 zur Verbesserung der allgemeinen Umweltleistungen besteht in der Festschreibung von Kontroll- und Behandlungskriterien bei dem Umgang mit Abfällen und lehnt an die Segmente des in Kapitel 3.1 erläuterten Schredderprozesses an. Das Verfahren sichert den fachgerechten Umgang mit In- und Outputströmen in Bezug auf die Genehmigungslage des Schredders. Die BVT umfassen den Aufbau und die Implementierung

- einer Abfallcharakterisierung und Handlungsanweisung zur Vorabkontrolle,
- einer Handlungsanweisung zur Abfallannahme,
- eines Abfallverfolgungssystems und eines Abfallregisters,
- eines Output-Qualitätsmanagementsystems

sowie die Sicherstellung

- der Abfalltrennung (getrennte Lagerhaltung),
- der Abfallkompatibilität vor dem Mischen oder Verschneiden und
- der Sortierung von eingehendem festen Abfall.

Die Kapiteln 2.3.2.1 bis 2.3.2.9 des BVT-Merkblatts führen eine detaillierte Beschreibung zu den geforderten Anweisungen, Dokumentationen und Prüfpflichten auf. Die Annahme- und Befundungsprozesse an Schredderanlagen sind auf eine quantitative Bewertung der Fremd- und Störstoffe beschränkt. Eine Qualitätsbewertung erfolgt im Wareneingang auf Grund der Losgrößen primär durch den visuellen Abgleich vom gelieferten Material zu der Klassifizierung im Lieferschein. Die neue Vorabkontrolle der BVT beinhaltet die Einführung repräsentativer Abfallbeprobungen und deren Analyse im Labormaßstab. Laut gelisteter Definition ist diese Probe dann repräsentativ, wenn sie alle werkstofflichen Eigenschaften

des Materials im Verhältnis zu der Mengenverteilung in der Ladung unter Grenzbedingungen abbildet. Diese Vorgehensweise ist eine Ableitung aus der klassischen Abfallwirtschaft und für Schrottinputfraktionen, in Anbetracht der heterogenen stofflichen Zusammensetzung, so nicht realisierbar. Die Vorabkontrolle beinhaltet des Weiteren eine Abschätzung der stoffstromspezifischen Mengen pro Ladung und Jahr, die in Verbindung mit dem volatilen Marktverhalten und der stofflichen Diversifikation der Inputströme schwer prognostizierbar sind.

Die Kapitel 2.3.2.5 bis 2.3.2.9 spielen im Kontext mit der Mengen- und Lagerbegrenzung der SLF eine wesentliche Rolle. Zum einen greifen durch die geforderten Maßnahmen sicherheitsrelevante Aspekte bei der Verarbeitung gaserzeugender, exothermer/leicht entflammbarer Fraktionen. Zum anderen dienen Materialflussanalysen der Leistungsüberwachung und helfen bei der Rückverfolgung von Qualitätsschwankungen im Materialeingang. Das Prinzip der negativen Vorsortierung am Schredder verfolgt dabei die Reduzierung von wertlosen Abfallströmen und die Einhaltung der Qualitätsstandards bei den wertstoffhaltigen Outputfraktionen E40 und der SSF.

### **6.2.3 BVT 3: Emissionsquellenverzeichnis**

Die Einführung und Anwendung eines Emissionsquellenverzeichnisses wird über die BVT 3 zur Erleichterung der Minderung von Emissionen in Gewässer und in die Luft geregelt. Die Einbindung einer emissionstechnischen Dokumentation in den Regelkreis des BREF verdeutlicht die Relevanz des Themenschwerpunkts für den Gesetzgeber. Die Inventarisierung des Abwasser- und Abgasstroms wird als Teil des UMS geführt und beinhaltet umweltrelevante Informationen zu den behandelten Abfällen und die Abfallbehandlungsprozesse in Form von

- vereinfachten Verfahrensfliessbildern zur Darstellung der Emissionsquellen,
- Beschreibungen prozessintegrierter Techniken der Abwasser-/Abgasbehandlung und ihrer Leistungsparameter und
- der Charakterisierung der Abwasser- und Abgasströme (physikalische Eigenschaften, stoffliche Zusammensetzung, Mengenanlagen).

Geknüpft an die Ausführung des Kapitels 2.3.1.2 im BVT-Merkblatt liegt der Schwerpunkt der BVT 3 in der Bewertung der emissionstechnischen Schadstoffbelastung der Anlage. Im Vergleich zur chemischen Abfallbehandlung ist dieser Ansatz für Großschredder neu und

erfordert ein detailliertes Prozess- und Materialverständnis über die verarbeiteten Inputströme und ihre emissionstechnischen Effekte.

## **6.2.4 BVT 4: Abfallagerung**

Die BVT zur Verringerung des mit der Abfallagerung assoziierten Umweltrisikos durch die Optimierung der Lagerwirtschaft, knüpft an die vorgelagerten BVT 2 und 3 an. Mit dem Bewusstsein über die behandelten Abfälle bzw. Schrotte und ihre Nebenprodukte, eröffnet sich die Möglichkeit zum umweltgerechten und effizienten Umgang mit Lageranlagen und Kapazitäten.

Die BVT fordern ein optimiertes Lagermanagement, das unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine negative Wechselwirkung von Abfall und den Schutzgütern vermeidet und zu einer Reduzierung der Umschlagshäufigkeit des Materials führt (siehe Kapitel 6.2.5). Der letzte Punkt zielt auf die Themen Staubentwicklung und Brandgefahr ab, die auch in Verbindung mit dem Bedarf einer geschlossenen Lagerung der SLF gebracht werden können. Zusammenfassend lassen sich die BVT 4 durch

- die Optimierung des Lagerstandorts,
- ausreichende Kapazitäten,
- den sicheren Lagerbetrieb und
- die gesonderte Lagerung und Handhabung verpackter gefährlicher Abfälle

darstellen. Durch die Spezifikation der ausreichenden Lagerkapazitäten in Hinblick auf die Vermeidung von Bränden und die Festlegung der maximal zulässigen Verweildauer von Abfällen, kommt dem Thema nicht nur eine genehmigungstechnische Brisanz zu, sondern auch eine brandschutztechnische. Streng genommen erhält die Konformität mit den einschlägigen Forderungen der VdS Schadenverhütung GmbH (VdS), durch diese BVT Einzug in den sicheren Anlagenbetrieb. Weitere Ansätze dazu finden sich in den BVT 21 mit der Forderung nach einem Brand- und Explosionsschutzsystem mit Maßnahmen und Geräten zum Vorbeugen, Detektieren und Löschen. Die BVT bestehen darüber hinaus aus Verfahren zur Kontrolle und Aufzeichnung unfall- und ereignisbedingter Emissionen, sowie aus geländetechnischen Sicherungsmaßnahmen, auch gegen das unzulässige Eindringen von außen (Vandalismus).



## 6.2.5 BVT 5: Abfallumschlag

Die Verringerung des mit dem Handling und dem Umschlag bzw. Transport von Abfall assoziierten Umweltrisikos wird durch die BVT 5 abgebildet. Für die Schredderbetriebe relevant sind in dieser Anweisung die baulichen und betrieblichen Vorkehrungen zur Behandlung pulverförmiger Abfälle bspw. der SLF-fein durch Absaugmaßnahmen oder den eingehausten Transport mittels Förderbändern. Weiter werden Maßnahmen zur Vermeidung, Erkennung und Verringerung von Leckagen genannt.

## 6.2.6 BVT 6 bis 12: Emissionsgrenzen Wasser

Die BVT 6 bis 12 fassen den Überwachungsbedarf gemäß BREF differenziert für Energie- und Rohstoffeinsätze sowie für den Einfluss auf Boden, Gewässer und die Luft zusammen. Das Kapitel 2.3.3.1 im BVT-Merkblatt formuliert dazu ein geplantes und reguliertes Probe- und Überwachungsprogramm. Das Spektrum der überwachtungswürdigen Parameter erstreckt sich auf:

- gefasste, diffuse und flüchtige Emissionen in die Atmosphäre, Gewässer oder Kanäle,
- Abfälle, im Besonderen Gefährliche,
- die Kontamination des Bodens, Gewässern und der Luft,
- den Verbrauch von Wasser, Brennstoffen, Energie, Sauerstoff, Stickstoff und anderen Gasen (bspw. Argon),
- den Ausstoß thermischer Energie, Lärm, Geruch und Staub,
- die Effekte auf spezifische Bereiche des Umwelt- und Ökosystems,
- Betriebs- und Beinaheunfälle,
- Personenverletzungen,
- Transportunfälle und
- Beschwerden von Anwohnern.

Darüber hinaus restringiert der Beschluss die Überwachung nicht auf rein analytische Messmethoden, sondern bezieht regelmäßige Wartungs- und Sicherheitschecks sowie visuelle Kontrollen mit ein.

Die BVT 6 bestehen aus der Überwachung der wichtigsten Prozessparameter bei relevanten Emissionen in Gewässern und werden durch die Forderungen der BVT 7 ergänzt. Die

Erfassung der Emissionen erfolgt gemäß der oben genannten Inventarisierung relevanter Stoffe im Abwasserstrom (BVT 3) und an solchen wichtigen Stellen, die am Einlass und/oder Auslass der Vorbehandlung, am Einlass zur Endbehandlung oder dort liegen, wo Emissionen den Anlagenprozess verlassen.

Damit werden auch solche Bereiche erfasst, die sich an Lösch- und Sprühwasserentnahmestellen befinden oder an denen Prozesswasser in den Schredder eingebracht wird bzw. diesen verlässt. Auf Grund der geringeren Relevanz für diese Arbeit, werden die Mindestfrequenzen für die Überwachung von Wasseremissionen der BVT 7 wie folgt mit den BAT-AEL der BVT 20 für Schredderanlagen in den Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst:

**Tabelle 4: BREF Emissionsgrenzen für Direkteinleiter von Prozesswasser**

Stoff/Stoffgruppe	Normen	Frequenz	BAT-AEL
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	-	monatlich	30 - 180 mg/l
Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)	EN 1484	monatlich	10 - 60 mg/l
Abfiltrierbare Stoffe	EN 872	monatlich	5 - 60 mg/l

**Tabelle 5: BREF Emissionsgrenzen für Direkt- und Indirekteinleiter von Prozesswasser**

Stoff/Stoffgruppe	Normen	Frequenz	BAT-AEL
Kohlenwasserstoff-Index	EN ISO 9377-2	monatlich	0,5 - 10 mg/l
Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb), Zink (Zn)	EN ISO 11885 EN ISO 17294-2 EN ISO 15586	monatlich	zwischen 0,01 - 2 mg/l
Quecksilber (Hg)	EN ISO 17852 EN ISO 12846	monatlich	0,5 - 5 µg/l

Verbindlich werden die genannten Grenzwerte erst durch die Umsetzung in nationales Recht.

Wenn keine EN-Normen für die Überprüfung der Emittenten verfügbar sind, besteht die BVT in der Anwendung von ISO-Normen, national oder international äquivalenter wissenschaftlicher Standards (siehe rückwirkend Kapitel 2.6). Im Falle stabiler Schadstoffverhältnisse können die Nachweiszyklen generell und bei der Indirekteinleitung, unter Verwendung einer vorgeschalteten Abwasserbehandlungsanlage, ausgedehnt werden. Trotz der Reduktion auf schredderspezifische Einleitwerte, stellt sich der Überwachungsbedarf in einem erheblichen Parameterumfang dar, der in der Entwurfsphase des BREF zusätzlich Gesamtstickstoff und -phosphor als Randbedingung für Schredder diskutierte. Für die Überwachung der CSB und TOC gilt, dass nur eine dieser Messungen anzuwenden ist. TOC ist dabei bevorzugt, da kein Cr(VI) als Oxidationsmittel verwendet wird. Die Unterscheidung

von direkter und indirekter Einleitung hat keinen grenzwertspezifischen Effekt auf Metalle und Metalloide und verdeutlicht die Schärfe der neuen Emissionsgrenzen. Die relevanten Techniken zur Optimierung des Wasserverbrauchs, zur Minderung von Emissionen in Böden und Gewässer durch platzorganisatorische Maßnahmen und die Behandlung von Abwässern, sind in den BVT 19 und 20 erfasst.

### **6.2.7 BVT 8: Emissionsgrenzen Luft**

Die prozesstechnischen Randbedingungen zur Überwachung von gefassten Emissionen in die Luft decken sich mit den Forderungen zur Verwendung der EN-Normen aus dem Gewässerbereich. Überwacht werden nur solche Stoffe, die gemäß ihren Merkmalen als relevante Stoffe im Abgasstrom identifiziert werden und in den BVT 3 genannten Inventarlisten für Abgasströme geführt sind. Die Kontrolle der relevanten Parameter kann laut Kapitel 2.3.3.4 durch Online- bzw. Dauermessungen oder über die Analyseergebnisse von einzelnen Abluftproben erfolgen. Das BREF definiert für Luftemissionen die Dauermessungen als das Mittel aus Stunden- oder Halbstundenwerten über den Zeitraum eines Tages. Die periodische oder Kurzzeitmessung bildet den validierten Mittelwert über drei aufeinanderfolgende Messungen a' 30 Minuten. Der Umfang der untersuchten Parameter und daran gebundene Zyklen hängt u.a. von der Abfallart und seiner Zusammensetzung ab. Die Überwachungshäufigkeit kann auch hier reduziert werden, wenn die Emissionswerte eine ausreichende Stabilität aufweisen. Tabelle 6 fasst den messtechnischen Rahmen unter Einbindung der BVT 25 wie folgt zusammen:

**Tabelle 6: BREF Emissionsgrenzen in die Luft**

Stoff/Stoffgruppe	Normen	Frequenz	BAT-AEL	BVT
TVOC	EN 12619	einmal alle 6 Monate	-	8, 25
Staub	EN 13284-1	einmal alle 6 Monate	2 - 5 mg/Nm <sup>3</sup> 10 mg/Nm <sup>3</sup>	8, 25
Metalle und Metalloide außer Hg (z. B. As, Cd, Kobalt (Co), Cr, Cu, Mangan (Mn), Ni, Pb, Antimon (Sb), Selen (Se), Thallium (Tl), Va- nadium (V))	EN 14385	einmal im Jahr	-	8, 25
PCDD/F	EN 1948-1, -2, und -3	einmal im Jahr	-	8, 25
dl-PCB	EN 1948-1, -2, und -4 CEN/TS 1948-5	einmal im Jahr	-	8, 25
Bromierte (Br) Flammschutzmittel	-	einmal im Jahr	-	8, 25

Für Großschredderanlage zu Metallaufbereitung werden lediglich BAT-AEL für Staub definiert. Der Grenzwert für Staub wird auf 2 bis 5 mg/Nm<sup>3</sup> festgesetzt. Unter der Voraussetzung, dass bei der Abluftbehandlung kein Gewebetrockenfilter eingesetzt ist, bzw. werden kann (Nassabscheidung), liegt das obere Ende der Bandbreite bei 10 mg/Nm<sup>3</sup>. Diese Grenzwertbestimmung gilt auch für Neuanlagen. Kapitel 3.1.2.1.2 des BVT-Merkblatts beleuchtet und argumentiert in diesem Zusammenhang das Aufkommen von Schwermetallen in der SLF und im Wirkkreis des Schredders in Form von Bodenkontamination durch diffuse Staubeinträge.

Mit dem Verweis auf Teil III des Anhang C der Stockholmer Konvention, wird das Aufkommen von persistenten organischen Schadstoffen (POPs) an Schredderanlagen begründet. Hier gelten besonders Schredderanlage zur Verarbeitung von Altkarossern und Elektroaltgeräten als unbeabsichtigte Quellen von chlorierten organischen Verbindungen.

Die Messperiode für polychlorierte Dibenzodioxide und Dibenzofurane (PCDD/F) oder dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) [50] wird einmal jährlich und in Form der Einzelmessung auf eine Messdauer von sechs bis acht Stunden festgelegt. Kapitel 3.1.2.1.4 des BREF schätzt die Auftretenswahrscheinlichkeit von PCDD/F oder dl-PCB [31] an Schredderanlage zukünftig als geringer ein. Des Weiteren wird vermerkt, dass die Temperatur im Mühlenraum tendenziell 70 °C nicht übersteigt und sich im Kunststoff gebundene

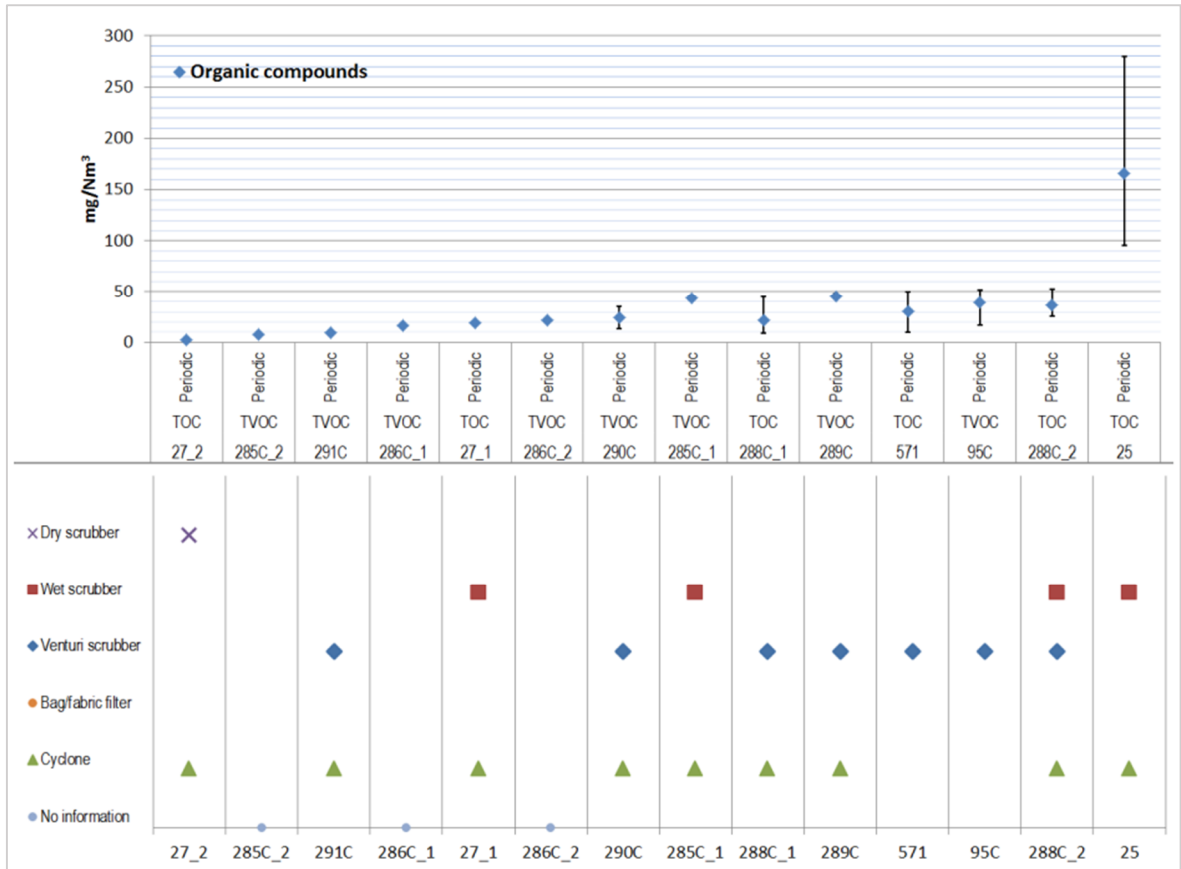
Stoffe trotz Dekompaktierung nicht herauslösen. Eine Studie der European Recycling Industries' Confederation in dem genannten Kapitel, leitet den Zusammenhang von diffusen Emissionen und der Konzentration von dl-PCB im Umfeld von Schreddern her. Weitere Studienergebnisse weisen u.a. darauf hin, dass die Depositionswerte von PCB-126 tendenziell höher seien, als die der PCDD/F. Das BVT-Merkblatt zieht aus diesen Ergebnissen die Erkenntnis, dass die genannten Störstoffe aus unterschiedlichen Quellen rühren müssen oder andere Expositionswege nehmen. Die wesentlichen Schritte zur Vermeidung von PCB- und Dioxinmissionen in die Luft, werden durch das Vermeiden oder Verringern

- von PCB-haltigem Material im Input des Schredders,
- von Verpuffungen und Bränden und
- von diffusen Emissionen in die Luft

definiert. Dasselbe gilt laut Kapitel 3.1.2.1.5 für den Umgang mit bleihaltigen Stoffen im Schredderprozess.

Die ebenfalls als POP geführten, aber in besonderem Maße in Form von Gehäusekunststoffen in Elektroaltgeräten oder in Altfahrzeugen als Motorraumabdeckungen, Isolatoren, PU-Schaumstoffe etc. bis mindestens 2012 verbauten und als Flammschutzhemmer eingesetzten polybromierten Diphenylether (PBDE) und speziell Decabromdiphenylether (DecaBDE), haben weniger Auswirkungen auf das Emissionsverhalten in der Luft, als vielmehr Auswirkungen auf den Abfallbereich am Schredder. Unter der Anwendung der EU POP-Verordnung 2019/1021 können gewissen Kunststofffraktionen aus der SLF oder SSF zukünftig nicht mehr stofflich verwertet werden [51] [52]. Der messtechnisch geforderte Überwachungszyklus der bromierten Flammschutzmittel im Abgas beläuft sich auf einmal jährlich.

Kapitel 3.1.2.1.3 des BREF schätzt die effektiven VOC Emissionen auf Grund der geregelten Schadstoffentfrachtung des Vormaterials (End-of-life Vehicles Directive (2000/53/EC) und der WEEE2 (2012/19/EU)) als weniger wahrscheinlich ein. Die Abbildung 16 zeigt die gemessenen TOC- und TVOC-Werte für die Verarbeitung von Schrotten in verschiedenen Schreddern unter der Verwendung unterschiedlicher Abluftnachbehandlungssysteme. Die gemessenen Werte liegen geschlossen unter 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Eine Korrelation lässt sich aus der Kombinationen der diversen Abgassysteme und den gemessenen Einzelwerten jedoch nicht ableiten.



**Abbildung 16: TOC- und TVOC-Messhistorie an Schredderanlagen (BREF 17. August 2018)**

Weitere Erkenntnisse zu diesem Thema liefert Kapitel 7.3 dieser Arbeit im Rahmen der messtechnischen Evaluation von historischen Emissionsdaten an Schredderanlagen der TSR.

Die Einbindung der BVT 29 zur mechanischen Behandlung FCKW-haltiger Komponenten und der BVT 30 zur Behandlung heizwertreicher Abfälle, wird aus der hier geführten Analyse ausgeschlossen, weil die Aufbereitung von kältemittelführenden Warenströmen am Schredder nicht vorgesehen ist und die SLF in diesem Zusammenhang nicht als heizwertreiche Inputfraktion geführt wird.

Generell kann das Kapitel 3.3 des BREF aber auf PST angewendet werden. Der Einsatz von FCKW-haltigen Materialien ist allerdings durch die Betriebsgenehmigung im Regelfall explizit ausgeschlossen.

Geruchsemissionen werden für Großschredder außerdem als nicht kritische bewertet, so dass auf die Detailausführung der BVT 9, 10, 12 und 13 verzichtet wird.

## 6.2.8 BVT 11: Roh- und Reststoffbilanzierung

Einen Abschluss findet das Überwachungsmanagement für Schredder – mit Ausnahmen der kontextbezogen weniger relevanten BVT 16 und 17 zur Reduzierung von Lärmemissionen – in den BVT 11 für die Erfassung des jährlichen Wasser-, Energie- und Rohstoffverbrauchs sowie des jährlichen Reststoff- und Abwasseraufkommens (Reststoffmanagementplan). Dieser Ansatz schließt an das genannte UMS an und ergänzt dieses um den Bereich Energie- und Ressourcenmanagement. Der Umfang der BVT zur Kontrolle- und Überwachung von umweltrelevanten Parametern zeigt die Notwendigkeit zur Prozesstransparenz auf. Ein allumfassendes Verständnis über die Zusammensetzung der Inputströme und die daraus resultierenden Effekte auf die Form und Bandbreite der Emissionen, sind für die Bewertung und Umsetzung der geforderten BVT essentiell.

## 6.2.9 BVT 14: Emissionsminderungsmaßnahmen Luft

Die Techniken zur Vermeidung bzw. Reduzierung von diffusen Luftverunreinigungen, insbesondere Staub, organischen Verbindungen und Geruch, werden durch die BVT 14 beschrieben. Die BVT lehnen an die klassischen Ausführungen zur Abluftnachbehandlung unter Kapitel 2.3.4 des BVT-Merkblatts an, welche im Rahmen der Schredderkonzeptionierung in Kapitel 9.2.2 dieser Ausarbeitung gesondert untersucht werden. Wobei zu vermerken ist, dass die spezifischen Anweisungen der BVT in diesem Abschnitt aus den Kapiteln 2.3.5.3/4 kommen. Die BVT definieren sich als Teil des UMS über die folgende Auswahl an operativen und designtechnischen Schritten.

- Die Begrenzung der Anzahl potentieller Emissionsquellen,
- die Verwendung von hochwirksam abgedichteter und widerstandsfähiger Einrichtungen (eingeschränkt bei der Anwendung im Bestand),
- ein effektiver Korrosionsschutz,
- die Einhausung, Sammlung und Behandlung (eingeschränkt durch Sicherheitsanforderungen und Abfallvolumina),
- die Befeuchtung oder Benebelung mit Wasser,
- die Wartung und vorbeugende Instandsetzung,
- die regelmäßige Reinigung der Behandlungs- und Lagerbereiche sowie
- die umfängliche Leckageüberwachung

können herangezogen werden, um die Vermeidung oder Verminderung von diffusen Emissionen aus Staub, Bioaerosolen und/oder VOC zu gewährleisten. Diffusen Quellen fehlt i.d.R. ein Abgasvolumenstrom. Sie lassen sich hinsichtlich des Ortes, an dem sie auftreten, nicht scharf eingrenzen. Die in der Anlagenumgebung des Schredders auftretenden Emissionen stammen dabei wesentlich aus Primärquellen (siehe auch VDI-Richtlinie 3790), können also durch die genannten Maßnahmen erfolgreich gefasst werden.

### **6.2.10 BVT 26 und 27: Unfälle und Ereignisse**

Die unter den BVT 26 hinterlegten Maßnahmen zur Verbesserung des ökologischen Gesamterfolgs und die Vermeidung von Emissionen durch Unfälle und Ereignisse, nehmen Bezug auf die in den BVT 14 formulierten Techniken zur Reinigung der Bereiche zur Abfallbehandlung und Abfalllagerung. Sie erweitern diese um

- die Implementierung eines detaillierten Kontrollverfahrens für ballierte bzw. gebündelte Abfälle vor dem Schredder,
- die Entfernung gefährlicher Gegenstände aus dem Abfallinput und ihre sichere Beseitigung (z.B. Gasflaschen, nicht schadstoffentrichtete Altfahrzeuge und Elektrogeräte, mit PCB und/oder Hg kontaminierte und radioaktive Komponenten) sowie
- die Behandlung von geleerten Behältern ausschließlich unter Vorlage der Sauberkeitsbescheinigung.

Diese BVT sind primär Präventivmaßnahmen für die Vermeidung von Verpuffungen am Schredder und werden operativ durch die Wareneingangskontrolle und den Befundungsprozess in der Materialannahme umgesetzt.

Auf Grund der Brisanz für Großschredderanlagen, behandeln die BVT 27 gesondert Schritte zur Vermeidung von Verpuffungen. Sie legen für den sicheren Betrieb am Schredder einen Managementplan, die Verwendung von Druckentlastungsklappen in der Peripherie (allgemein redundante Auslegung der Entstaubungseinrichtung) und den Einsatz von einem Vorschredder fest. Als Teil des UMS umfasst das betriebliche Regelwerk ein Programm zur Reduzierung, Kontrolle und Dokumentation von Verpuffungsereignissen. Die Reduzierung von Verpuffungen durch den Einsatz eines Vorzerreißers wird in Kapitel 3.1.1 des BVT-Merkblatts neben dem genannten Vorteil, auch als Nachteil der daraus resultierenden diffusen Emissionen und Kapazitätsbegrenzung dargestellt. Laut Kapitel 3.1.2.1.1



des BREF sind Verpuffungen bei einer effizient geführten Schredderanlage weniger als einmal pro Jahr zu verzeichnen. Ergänzend formuliert Kapitle 3.1.3 des Dokuments die Wassereindüsung in dem Mühlenraum und den Nasswäscher als weitere Maßnahmen zur Unterdrückung von Verpuffungen und ihrer Auswirkungen auf das Abluftsystem.

Hinweise oder Anordnungen zum ordnungsgemäßen Umgang mit Traktionsbatterien aus Zweirädern (speziell E-Bikes und Padelecs) und Elektromobilen des Personenkraftverkehrs, werden weder unter den BVT 27 noch anderen Abschnitten des BREF geliefert.

### **6.2.11 BVT 15 und 16: Abfackeln von Prozessgas**

Das kontrollierte Abbrennen von leicht entflammaren Gasen (Kohlenwasserstoffen) oder unter außerordentlichen Betriebsbedingungen im Zuge eines Druckabfalls, zählt nicht zu den typischen Prozessanwendungen an Schreddern. Durch die Verschleppung reaktionsträger Gase, wie Edelgase oder Stickstoff in der Peripherie oder die Erweiterung der Abluftnachbehandlung durch eine thermische Nachverbrennung, gewinnen die BVT allerdings für sicherheitsrelevante Einrichtung der Entstaubungstechnik an Bedeutung. Im Zusammenhang mit den in Kapitel 9 dieser Arbeit diskutierten Lösungen zu Abluftnachbehandlung, werden die BVT erneut aufgegriffen.

### **6.2.12 BVT 17 und 18: Emissionen Lärm und Erschütterungen**

Der Zerkleinerungsprozess im Schredder, die nachgeschalteten Vibrationsförderer sowie Lüfteranlagen, Verpuffungen und der Schrottschlag per se, erzeugen Erschütterungen und Lärmemissionen. Die BVT 17 und 18 dienen der Vermeidung bzw. Minderung von Lärmemissionen und Erschütterungen durch die Einführung und Umsetzung sowie regelmäßigen Überprüfung eines Managementplans für besagte Emissionen. Dieser im Rahmen des UMS erzeugte Plan besteht aus einer Protokollstruktur, die anwendungsspezifische Handlungsanweisungen, Umsetzungsfristen und Überwachungsmodalitäten beinhaltet. Die Lokalisation von Emissionsquellen ist dabei ebenso relevant, wie deren Belastungsmessung und Prognose sowie Beurteilung der resultierenden Teilimmissionspegel. Da die Anwendbarkeit der BVT auf solche Fälle beschränkt ist, in denen eine Emissionsbelastung an sensiblen Standorten zu erwarten und/oder nachgewiesen wird, ist der geforderte Maßnahmenkatalog sehr individuell. Lärmprognosen sind i.d.R. Teil einer Anlagengenehmigung oder im Falle einer Anlagenerweiterung, Teil der wesentlichen Änderungsgenehmigung nach § 16 BImSchG. Das Thema ist dadurch zunehmend fremdbestimmt, da gewachsene Strukturen, wie ein Gemengelage an Industriestandorten, dafür sorgen können, dass sich die

Anforderungen an die emittierten Werte, wesentlich verschärfen. Damit ist auch dieser ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess, der laut den BVT durch folgende Maßnahmen zu steuern ist:

- geeignete Lage von Einrichtungen und Gebäuden (platztechnische und wirtschaftliche Einschränkungen möglich),
- operative Maßnahmen,
- Einsatz von lärmoptimierten Ausrüstungen,
- Lärm- und Vibrationsschutzeinrichtungen,
- Lärminderung durch bauliche Maßnahmen (eingeschränkt durch Platzmangel oder Verpuffungsrisiko).

### **6.2.13 BVT 22 bis 24: Effizienzplanung**

Aus operativer Sicht, können die BVT für die effiziente Nutzung von Stoffen im Abfallrecycling, Energieeffizienzmaßnahmen und die Reduzierung des Abfalls durch das Wiederverwenden von Verpackungen, unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz zusammengefasst werden. Der bewusste Einsatz von Recyclingmaterial als Ersatz- und Zusatzstoff im Produktionsprozess (BVT 22), ist für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen ebenso relevant, wie die Verringerung des Verpackungsmülls durch das Prinzip der Wiederverwendung (BVT 24).

Die Wiederverwendung von Verpackungen (Fässer, Behälter, Großpackmittel, Paletten etc.) ist Teil des in den BVT 1 und 11 genannten UMS bzw. Reststoffmanagementplans. Verpackungen, die in gutem Zustand und nach Verträglichkeitsprüfung der eingefüllten Stoffe geeignet oder ausreichend gereinigt sind, werden einer Wiederverwendung unterzogen. Die Maximierung des Verpackungsrecyclings sorgt für die Reduzierung des Abfalls, der in die Beseitigung bzw. Entsorgung geht. Dieses Konzept führt dazu, dass der Abfallbehandler dem Status des Abfallerzeugers entgegenwirkt.

Der hochenergetische, mechanische Zerkleinerungsprozess an Schredderanlagen ist durch die Implementierung eines Energieeffizienzplans und die Aufzeichnung quellenabhängiger Energiebilanzen zu kontrollieren und energetisch zu verbessern (BVT 23). Der Energiebilanzbericht verbindet dabei die stofflichen Spezifika des behandelten Inputstroms mit ihrem energetischen Effekt. Dieser Ansatz ergänzt die zuvor beschriebene Aufforderung der BVT 11 zum besseren Verständnis der stofflichen Zusammensetzung vom produzierten Materialgemisch im Schredder, um das Bewusstsein über ihre energetischen Eigenschaften. Die Verarbeitungswerte und -grenzen der Anlage steuern das Materialinputportfolio

und nehmen Einfluss auf den Umfang der betrieblichen Vorbehandlung (siehe rückwirkend auch Kapitel 3.2). Die BVT 28 ergänzen diesen energetischen Effizienzansatz durch die homogene, mengenkonstante/gleichmäßige (keine Überladung) und kontinuierliche Beschickung des Schredders, dessen Effekte in Kapitel 9.2 dieser Arbeit weiter beleuchtet werden.

### **6.3 Novelle der TA Luft Stand 16.07.2018**

Durch die unmittelbare und mittelbare Umsetzung der genannten immissionsrechtlichen Änderungen des EU-Rechts, wird die TA Luft dem Anspruch einer konsistenten, vollzugsvereinfachenden und -vereinheitlichenden Verwaltungsvorschrift gerecht. Die Umsetzung der BVT-Schlussfolgerungen für Abfallbehandlungsanlagen erfolgt unmittelbar in der angepassten TA Luft. Eine Erarbeitung von gesondert sektoralen Verwaltungsvorschriften ist in diesem Kontext auf nationaler Ebene nicht vorgesehen [53].

Im folgenden Abschnitt werden die beschriebenen Änderungen und Ergänzungen des BVT-Merkblatts und seiner Schlussfolgerungen für Abfallbehandlungsanlagen mit der Novelle der TA Luft in Verbindung gebracht.

#### **6.3.1 Entwicklung der TA Luft Novelle**

Großschredder zur Fe-, Konsumgüter- und Metallschrottverarbeitung werden erstmalig als eigenständiger Anlagentyp der Entsorgungswirtschaft mit ausdifferenzierten emissions-technischen Vorgaben in die TA Luft aufgenommen. Der neue Umstand hat zur Folge, dass national festgelegte Emissionsbandbreiten über die Vorgaben des BREF hinausgehen. Der Änderungsentwurf der TA Luft sieht des Weiteren neue bzw. verschärfte Immissionswerte für bestimmte Schadstoffdepositionen vor, die ebenfalls in den folgenden Abschnitten für Anlagen zur Behandlung von nichtgefährlichen metallischen Abfällen in Schredderanlagen diskutiert werden [15].

Die Novellierung der aktuell noch rechtskräftigen TA Luft vom 24. Juli 2002 erstreckt sich über einen Zeitraum von mehreren Jahren (Stand 15. Dezember 2019). Im Jahr 2015 sind den Umweltverbänden mehrere Dokumente zur Erneuerung der Verwaltungsvorschrift durch das Umweltbundesamt zugänglich gemacht worden. Der Prozess findet seinen Beginn im Erstentwurf vom 29. Mai 2015, welcher in überarbeiteter Fassung vom 9. September 2016 in den aktuellen Entwurf vom 16. Juli 2018 mündet. Dieser bildet den Gegenstand der hier geführten Untersuchung, zu dem es keine weitere Verbändeanhörung geben soll

[54]. Durch dieses Verbändevorgehen ist der Akt der rechtlichen Überarbeitung der TA Luft, bereits vor Abschluss und Inkrafttreten des BVT-Merkblatts für Abfallbehandlungsanlagen angestoßen worden.

Aktuell ist nicht absehbar, wann und mit welchen Inhalten die neue TA Luft final veröffentlicht wird. Für die schredderrelevanten Regelungen ist aber davon auszugehen, dass sich diese nicht wesentlich vom gegenwärtigen Referentenentwurf unterscheiden werden.

Entsprechend der Analyse des BREF, setzt auch die folgende Untersuchung der TA Luft ihren Fokus auf die wesentlichen emissionsrechtlichen Rahmenbedingungen und Änderungen für Großschredderanlagen. Zum verbesserten Verständnis werden die komplexen Zusammenhänge des Gesetzestextes gemäß ihrem gemeinsamen Schwerpunkt extrahiert und farblich gewichtet (siehe Anhang B). Eine komprimierte Zuordnung der TA Luft zu den BVT findet sich in Kapitel 6.4, als Fazit der hier durchgeführten Auswertung.

Der strukturelle Aufbau der Novelle hat sich zu seiner Vorgängerschrift nicht verändert, so dass die Verwendung von Nummern an Stelle von Kapiteln als Ordnungsrahmen bestehen bleibt. Nummer 1 legt den Anwendungsbereich der Vorschrift fest. Die Nummer 2 definiert emissionsrechtliche Begrifflichkeiten und die physikalischen Randbedingungen im Messwesen. In Nummer 3 werden rechtliche Grundsätze für die Genehmigung, den Vorbescheid und die Zulassung des vorzeitigen Beginns für IED-Anlagen beschrieben. Die Anforderungen zum Schutz vor (Nummer 4) und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen (Nummer 5) bilden den organisatorischen und technischen Teil der TA Luft. Die Nummer 4 gilt als Immissionsteil der Vorschrift uneingeschränkt für alle genehmigungsbedürftigen Anlagen. Der Emissionsteil der TA Luft, die bereits genannte Nummer 5, gilt dagegen nur für solche genehmigungsbedürftigen Anlagen, die nicht bereits durch Rechtsverordnungen zum BImSchG geregelt sind [17]. Die Nummer 6 ernennt nachträgliche Anordnungen. Den Abschluss findet das Dokument in den Nummern 7 und 8, der Aufhebung von Vorschriften und dem Inkrafttretensbeschluss, der bisher noch nicht unterzeichnet ist. Eine wesentlich strukturelle Ergänzung besteht in der Integration der Regelungen zum Schutz erheblicher Belästigungen durch Geruchsimmissionen. Basis dafür ist die Geruchsimmissionsrichtlinie (GIRL), die von den Ländern bereits in gering inhaltlicher Abweichung vollzogen wird. Der Begriff „Geruch“ wird bereits in Nummer 2.1 unter der Definition von Luftverunreinigungen bzw. Immissionen aufgerufen. Nummer 4.3.2 nimmt das Thema als festen Bestandteil der Emissionsprüfung auf und vereinheitlicht die Anforderungen an Gerüche damit bundesweit [53].

Entgegen des BVT-Merkblatts, liegt die Stärke der TA Luft nicht in der Festlegung betriebsorganisatorischer Abläufe, sondern eher in der klaren Definition von Genehmigungsanforderungen (Immissionen) und der Spezifizierung von Emissionsbegrenzungen. Durch die direkte Verbindung zum übergeordneten BImSchG, wird der normkonkretisierende Charakter der TA Luft deutlich. Die Auswirkungen auf den Betrieb von Großschreddern, sind aus dieser Prämisse heraus aber nicht weniger kritisch, wie sich in der nachfolgenden Analyse zeigt.

Die Nummer 5.1.1 der TA Luft-Novelle weist darauf hin, dass die Erkenntnisse der vorliegenden BVT-Merkblätter in den relevanten Abschnitten (Nummern 5.2, 5.3, 5.4 und 6.2) als Anforderungen berücksichtigt sind. Des Weiteren wird festgelegt, dass nachträglich veröffentlichte BVT-Merkblätter in Form von ergänzenden sektoralen Verwaltungsvorschriften übernommen werden und den Regelungen dieser Verwaltungsvorschrift vorausgehen. Diese Klausel macht deutlich, dass es sich bei der Novelle der TA Luft nicht um einen einmaligen Akt handelt. Vielmehr ist nach jeder Veröffentlichung einer aktualisierten, branchenbezogenen BVT-Schlussfolgerung zu gewährleisten, dass die neuen verbindlich geltenden Werte unter normalen Betriebsbedingungen eingehalten werden. Infolgedessen ist es die Pflicht der Überwachungsbehörden die rechtlichen Entwicklungen der TA Luft regelmäßig abzugleichen und ggf. basierend auf den neuen Informationen nachträgliche Anordnungen für die Anlagenbetreiber zu erlassen [9].

### **6.3.2 Nummern 5.4.8.9.1 und 5.4.8.9.12: Schredderanlagen**

Die wesentlichen Anforderungen der TA Luft für den Umgang mit Schreddern finden sich in den Nummern 3 bis 5, wobei die Nummer 5.4.8.9.1 der Novelle als separater Abschnitt für die emissionsrechtliche Parametrisierung von Schreddern entstanden ist. Die Konzentration der umweltrechtlichen und organisatorischen Regelungen für Schredder in den Nummern 5.4.8.9.1 und .12, bietet die Möglichkeit, Rückschlüsse auf die Inhalte der vorgeschalteten Abschnitte der TA Luft zu ziehen und diese entgegen der Kapitel- bzw. Nummernstruktur in die Untersuchung aufzunehmen. Nummer 5.4.8.9.1 definiert die Randbedingungen für den Betrieb von Anlagen zur Behandlung von nicht gefährlichen metallischen Abfällen, mit Bezug auf die Anlage 8.9.1 der 4. BImSchV und ist damit Zentrum der hier geführten Plausibilitätsanalyse.

Die Nummer 5.4.8.9.1 unterscheidet zwischen baulichen und betrieblichen Anforderungen, Anforderungen zur Messung und Überwachung sowie Emissionsgrenzen für Schredder.

Die baulichen und betrieblichen Anforderungen zeichnen sich durch emissionsmindernde Maßnahmen in Form von

- Sichtkontrollen bei der Vormaterialannahme,
- der Schadstoffentfrachtung und Prozessausschleusung im Rahmen der Sichtkontrolle (speziell Altfahrzeuge),
- der mechanischen Vorbehandlung,
- der Minderung diffuser Emissionen im Umschlag, der Lagerung und dem Transport,
- der Abgasreinigung gefasster Emissionsquellen und
- dem Umgang mit Betriebsstörungen der Abluftreinigungsanlage

aus. Die Maßnahmen stehen u.a. in Verbindung mit den vorgeschalteten Nummern 5.2.3.1 bis 5.2.3.6 der TA Luft zum Umgang mit staubförmigen Emissionen bei Umschlag, Lagerung oder der Bearbeitung von festen Stoffen. Die Unterkapitel definieren Anforderungen an das Umschlagverfahren, das -gerät und den -ort, Staubbindemaßnahmen und bauliche Schritte im Umgang mit diffusen Emissionen. Auf Grund der geringen Quellhöhe, tragen diffuse staubförmige Emissionen überproportional zur lokalen Staubbelastung an Schreddern bei. Die in der VDI-Richtlinie 3790 Blatt 1 hinterlegten präprimären, primären und sekundären Minderungsmaßnahmen (End-of-Pipe-Technologien) finden durch die Nummern 5.2.3 ff Eingang in die TA Luft [17]. Rückblickend finden sich hier auch Ansätze aus den BVT 2, 4 und 5 des BREF wieder.

Die Nummer 5.4.8.9.1 erweitert die genannten Nummern um spezifische Parameter für Schredder. Die Anforderungen der Nummern 5.2.3 ff. bleiben in ihrer Geltung dadurch weitestgehend unberührt. Die Sichtkontrolle legt spezielles Augenmerk auf Fehlwürfe und Störstoffe in Form von Hohlkörpern und Druckbehältern sowie Material mit leicht entflammaren oder akut toxischen Eigenschaften. Aus der Beschreibung der BVT-Schlussfolgerung für Abfallbehandlungsanlagen (Kapitel 6.2) ist bekannt, dass die Notwendigkeit der Befundung in der aktiven Vermeidung und Verminderung von Verpuffungen und daraus resultierender Brände und Immissionen liegt. Die Nummer schließt damit auch an die Regelungen der BVT 26 an.

Die ordnungsgemäße Vorbehandlung von Restkarossen und Altfahrzeugen gemäß AltfahrzeugV ist durch ausreichend häufige Stichproben zu belegen oder in Verdachtsfällen zu überprüfen (u.a. durch Dekompaktierung). Dasselbe gilt laut der Novelle für die Kontrolle des Schreddervormaterials auf eine hinreichende Schadstoffentfrachtung. Baugruppen und

Bauteile sind dann zurückzuweisen oder bei entsprechender Genehmigung von Komponenten zu befreien, wenn diese gefährlichen Stoffe, wie bspw. PCB, Hg oder Asbest enthalten. Mit diesem Abschnitt nimmt der Neuentwurf auch Bezug auf das vorangestellte ElektroG2.

Zur Minderung von Emissionen und Emissionsspitzen, ist das schadstoffentfrachtete Inputmaterial entsprechend seiner Beschaffenheit mechanisch vorzubehandeln und dem Schredder gleichmäßig und kontinuierlich zuzuführen. Dieser Ansatz verweist u.a. auf die Anwendung eines Vorzerreißers oder einer Vorsiebung. Der Einsatz einer geeigneten Steuerungstechnik zur kontinuierlichen Beschickung des Schredders wiederum, nimmt Bezug auf die BVT 28 zur Energieeffizienzsteuerung. Zu ergänzen ist dieser Punkt mit den Maßnahmen zur Energieeinsparung, einschließlich elektrischer Energie und zur effizienten Energienutzung der Nummer 5.2.11. Der Abschnitt differenziert zwischen allgemeinen, thermischen und elektrischen Maßnahmen, die dem Vorbild des BVT-Merkblatts entsprechend, auch den effizienten Einsatz und die Rückführung von Roh- und Reststoffen in den Verarbeitungsprozess berücksichtigen. Auf Grund der hohen Deckungsgleichheit mit den BVT 28, wird auf die weitere Ausführung der Inhalte zur geforderten Energieeinsparung verzichtet.

Weiter benennt die Nummer 5.4.8.9.1 explizite Maßnahmen zur Minderung diffuser Emissionen durch das Einhausen, Kapseln und Punktabsaugen des Schredders, der Siebeinrichtungen und den Bandübergängen. Mit Hilfe von Wasserbefeuchtungseinrichtungen an Aufgabe- und Abwurfbandern sowie Abkip- und Verladezonen, sollen Stäube an der Quelle der Entstehung gebunden werden. In diesem Zusammenhang wird auch der Umgang mit der SLF oder anderen stark staubenden Fraktionen, wie Sinter aus Gießereien, Schreddersanden oder Verladeresten geregelt. Diese Fraktionen sollen mindestens windgeschützt gelagert und ggf. befeuchtet werden. Die Nummer 5.4.8.12 zur zeitweiligen Lagerung von Fe- oder NE-Schrotten, einschließlich Autowracks, erweitert die geforderten Lagerstrukturen. So sollen freigelagerte, staubende Abfälle auf ein Mindestmaß beschränkt und sämtliche Betriebsflächen mit einer Decke aus Asphaltbeton, Beton oder gleichwertigen Materialien befestigt werden. Diese Lagerflächen sind laut Nummer 5.2.3.5.2 der Novelle unverzüglich bei Verschmutzung und Staubbelastung zu reinigen (steht in Bezug zu den BVT 4 und 14). Unabhängig von diesen Anforderungen eröffnet die Nummer 5.4.8.12 einen Nebenschauplatz, der für Großschredderanlagen von entsprechender Bedeutung ist. Der im Rahmen der Vorsortierung als Schwerteil ausgeschleuste Träger- und Brennschrott, wird sehr häufig aus logistischen Gründen vor Ort in einer Nebeneinrichtung behandelt. Die

Novelle fordert für den Brennschneidbetrieb mit Sauerstofflanze, den Einsatz von geeigneten Abgasreinigungseinrichtungen (Brennhauben) unter Anwendung der VDI-Richtlinie 4085 [53].

Einen Abschluss finden die baulichen und betrieblichen Maßnahmen der Nummer 5.4.8.9.1 in der Beschreibung geeigneter Maßnahmen für die Behandlung gefasster Quellen. Diese Quellen sind ebenfalls abzusaugen und einer geeigneten Abgasreinigungseinrichtung zuzuführen. Bei einer Betriebsstörung der Abgaseinrichtungsanlage soll eine automatische Abschaltung des Schredders erfolgen. Technisch lehnt der Abschnitt an die BVT 14 zur Vermeidung diffuser Emissionen in die Luft an. In einer zwischenzeitlichen Entwurfsversion wird bei einer Störmeldung der Abgaseinrichtung, sinnvoller Weise das Stoppen der Materialzufuhr als Erstmaßnahme festgelegt. Der finale Entwurf fordert jetzt wieder die Abschaltung der gesamten Schredderanlage.

Die Anforderungen zur Messung und Überwachung an Schreddern werden in Kombination mit den Emissionsgrenzen durch die folgende Tabelle 7 zusammenfasst.

**Tabelle 7: TA Luft-Novelle Emissionsgrenzen in die Luft**

Stoffe	Normen	Frequenz	Grenzwert	Nummer
TVOC	VDI 3481 Blatt 1 DIN EN 12619	einmal alle 6 Monate	50 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.5
Gesamtstaub	VDI 2066 Blatt 1 DIN EN 13284-1	einmal alle 6 Monate	5 mg/Nm <sup>3</sup> 10 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.1, 5.2.2
Schwermetalle Klasse I (staubförmig anorganisch)	VDI 3868 Blatt 1	einmal im Jahr	0,01 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.2
Schwermetalle Klasse II	VDI 3868 Blatt 1	einmal im Jahr	0,5 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.2
Karzinogene Stoffe Klasse I	-	einmal im Jahr	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.7.1.1
Karzinogene Stoffe Klasse II (speziell Benzol und Ni)	-	einmal im Jahr	0,5 mg/Nm <sup>3</sup>	5.2.7.1.1
PCDD/F	VDI 3499 Blatt 1 DIN EN 1948-1	einmal im Jahr	0,1 ng/Nm <sup>3</sup>	5.3.2
Σ PCDD/F, dl-PCB	VDI 3499 Blatt 1 DIN EN 1948-1/4	einmal im Jahr	0,1 ng/Nm <sup>3</sup> anzustreben	5.2.7.2
PBDD/F	-	einmal im Jahr	-	5.3.2



Schredderanlagen werden entsprechend dem BREF (BVT 8) auch in der TA Luft-Novelle als mögliche Quellen von Dioxinen, Furanen und PCB genannt, die wiederkehrend einmal jährlich messtechnisch unter der Verwendung der in Anhang 5 gelisteten Messverfahren zu überprüfen sind. Auf Grund der des Gefährdungspotentials gilt für diese Stoffe auch ein Emissionsminimierungsgebot [17]. Die geforderten Grenzwerte für die PCDD/F liegen in Summe bei 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> gemäß Anhang 4 des Entwurfes fakturiert mit dem Toxizitätsäquivalent (Nummer 5.3.2) [31].

Nummer 5.2.7.2 gilt dabei mit der Maßgabe, dass für die Summe aller in Anhang 4 gelisteten, schwer abbaubaren, leicht anreicherbaren und hochtoxischen organischen Stoffe (PCDD/F und dl-PCB) unter Anwendung des Äquivalenzfaktors, die Massenkonzentration im Abgas von 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> anzustreben ist (Richtwert).

Unter der Voraussetzung, dass das Schreddervormaterial bromierte Flammschutzhemmer enthält, hat die messtechnische Überprüfung der polybromierten Dibenzo(p)dioxine und -furane (PBDD/PBDF) im Abgas ebenfalls einmal jährlich zu erfolgen [52]. Ein Scharfschalten der genannten Vorgaben der TA Luft erfolgen erst durch die Aufnahme dieser in die Nebenbestimmungen der Anlagengenehmigung.

Die neue Verordnung setzt die Grenzwerte für Gesamtstaub in der gereinigten Abluft auf eine Massenkonzentrationsschwelle von 5 mg/Nm<sup>3</sup> fest. Unter der Voraussetzung, dass bei Altanlagen keine Trockenentstaubung installiert ist und die Abluft mittels Nasswäschereinrichtung behandelt wird, gilt ein Grenzwert von 10 mg/Nm<sup>3</sup>. Diese Obergrenze wird durch Nummer 5.2.1 gestützt, in der die maximale Konzentration für staubförmige Emissionsquellen mit einem Massenstrom von 0,40 kg/h auf 10 mg/Nm<sup>3</sup> in der Abluft festgelegt wird. Dieser massenbilanzierte Schwellwert dürften bei allen Großschredderanlagen in Deutschland überschritten werden. Der Gesamtstaub schließt in der genannten Vorgabe den Feinstaub mit ein und ist halbjährlich nachzuweisen.

Weiter wird durch die Nummer 5.4.8.9.1 für Schredder die Notwendigkeit der Messung von staubförmigen anorganischen (Nummer 5.2.2) oder karzinogenen Stoffen (Nummer 5.2.7.1.1) im Einzelfall festgelegt. Nummer 5.2.2 umfasst Stoffe, die emissionstechnisch besonders wirkungsrelevant sind. Für Schredderanlagen sind hier insbesondere Schwermetalle von Bedeutung. Auf Grund ihrer Persistenz und Anreicherbarkeit in der Umwelt, sind Emissionen durch Schwermetalle zu vermeiden [17]. Werden Messungen dieser Schwermetalle auf Grund der Zusammensetzung des Inputmaterials am Schredder als notwendig erachtet, sollen diese einmal jährlich auf Ihre Zusammensetzung und Konzentration

überprüft werden. Auch hier entsteht eine Messverpflichtung bzw. Einhaltung der Grenzwerte erst durch die Aufnahme dieser in die Genehmigungsnebenbestimmungen der entsprechenden Betriebseinheit. Damit sind die in Nummer 5.2.2 genannten Grenzwerte für Pb von  $0,5 \text{ mg/Nm}^3$  vorerst nicht allgemein nachweispflichtig.

Gemäß Nummer 5.2.7.1.1 darf auch bei dem Vorhandensein mehrerer karzinogener Stoffe der Klasse I, als Mindestanforderung insgesamt die Massenkonzentration von  $0,05 \text{ mg/m}^3$  bzw. der Massenstrom von  $0,15 \text{ g/h}$  im Abgas an Schreddern nicht überschritten werden. Der Nachweis dazu ist einmal jährlich zu erbringen, wie in Tabelle 7 dargestellt. Generell kann für karzinogene und mutagene Stoffe keine Unbedenklichkeitsschwelle festgelegt werden [17]. Da die Klasse I Komponenten eher in Spuren im Vormaterial vertreten sind, sind für Schredder besonders die in Klasse II aufgeführten Stoffe Benzol sowie Ni und seine Verbindungen relevant. Die in Klasse II gelisteten Stoffe dürfen die Massenkonzentrationen von  $0,5 \text{ mg/m}^3$  bzw. der Massenstrom von  $1,5 \text{ g/h}$  nicht überschreiten.

Die Anforderungen der Emissionen aus organischen Stoffen der Klassen I und II findet für Schredder auf Grund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit keine Anwendung. Damit gilt lediglich der allgemeine Grenzwert von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  für den TVOC in der gereinigten Abluft. Die Nachweispflicht besteht einmal im Halbjahr.

Zusammenfassend sind in Bezug auf organische Parameter die Messungen des TOC/TVOC, der karzinogenen und schwer abbaubaren, leicht anreicherbaren und hochtoxischen organischen Stoffen damit ausreichend [53].

Alle erwähnten Grenzwerte werden erst durch die Aufnahme in den Genehmigungsbescheid verbindlich, ebenso die zukünftigen Messverpflichtungen.

### **6.3.3 Einzelmessungen**

Die Emissionsmessungen sollen laut TA Luft unter Beachtung der in Anhang 5 aufgeführten Richtlinien und Normen des VDI/DIN-Handbuchs zur Reinhaltung der Luft und der darin beschriebenen Messverfahren durchgeführt werden. Alternative, aber nachgewiesen gleichwertige Verfahren können nach Nummer 5.3.5 ebenfalls angewendet werden.

In diesem Teil der TA Luft werden allgemeine Regelungen getroffen. Gibt es in Nummer 5.4 spezielle Regelungen für bestimmte Anlagentypen (bspw. Schredder), gehen die Speziellen, den allgemeinen Regelungen vor. Dasselbe gilt für die Grenzwerte der zuvor einbezogenen Nummer 5.2.

In Verbindung mit den § 26 und 28 BImSchG werden einmalige und wiederkehrende Messungen in den Nummern 5.3.2 und 5.3.3 bei genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen in der TA Luft fortgeschrieben und vervollständigt [53]. So sieht die Novelle unverändert zu ihrer Vorgängerversion die erstmaligen Messungen der gemäß Genehmigungslage spezifischen Grenzwerte nach drei bzw. spätestens sechs Monaten ihrer Inbetriebnahme vor. Wiederkehrende Messungen sind in Folge des BImSchG alle drei Jahre gefordert und können im Falle kürzerer Fristen nach Nummer 5.4 der TA Luft, unter Einbindung des Immissionsschutzbeauftragten durchgeführt werden. Im Falle kürzerer Messintervalle darf die beauftragte Person, das passende Equipment und die Fachkunde vorausgesetzt, die Messung selbst durchführen. Andernfalls kann auf den regelmäßigen Nachweis der Emissionsgrenzen durch Einzelmessungen dann verzichtet werden, wenn mit ausreichender Sicherheit festgestellt wird, dass diese nicht überschritten werden.

Der Einzelmessungsnachweis hat als eine Reihe von mindestens drei Einzelmessungen, bei ungestörter Betriebsweise mit höchster Emission und mindestens jeweils einer weiteren, bei regelmäßig auftretenden Betriebszuständen mit schwankendem Emissionsverhalten, zu erfolgen. Der Messzeitraum für die Einzelmessung liegt dem BREF entsprechend i.d.R. bei 30 Minuten, wobei bei Dioxinen und Furanen sechs Stunden angesetzt werden (siehe auch Kapitel 6.2.7).

Auf Grund der Emissionsschwankungen im Teillastbetrieb der Anlage, können für Großschredder weitere Messungen erforderlich sein. Bei Einzelmessungen hat jeder Messwert unter den genehmigungstechnisch festgelegten Konzentrationen zu liegen (Nummer 2.7).

### **6.3.4 Kontinuierliche Messungen**

Die Regelungen zur kontinuierlichen Messung sind in der Novelle weitestgehend unverändert und die zusätzlichen Parameter für die Schrottbranche nicht relevant. Eine Quelle ist für eine Dauermessung dann bedeutsam, wenn ihre Emission mehr als 20 % des gesamten Massenstroms der Anlage beträgt oder wenn der Massenstrom dieser die in Nummer 5.3.3.2 festgelegten Werte überschreitet.

Relevante Quellen sind ab einer Massenstromschwelle an staubfähigen Stoffen von 1 kg/h mit einer qualitativen Messeinrichtung (bspw. Differenzdruckmessung) auszustatten, die in der Lage ist, die Funktionsfähigkeit der Abgasreinigungsanlage und die festgelegte Emissionsbegrenzung kontinuierlich zu überwachen. Übersteigen die staubfähigen Stoffe die

Massenstromschwelle von 3 kg/h, sind die Massenkonzentrationen dieser Emissionen kontinuierlich zu ermitteln (quantitative Überwachung). Für die meisten Großschredderanlagen in Deutschland dürfte dies nicht der Fall sein.

Die Massenstromschwelle für den TVOC liegt bei dem für Schredder relevanten Grenzwert von 2,5 kg/h. Entsprechend der Einzelmessung gilt auch hier, dass bei wechselnder Betriebsweise einer Anlage oder bei Störanfälligkeit der Abluftreinigungsanlage, die kontinuierliche Messung für niedrigere Massenströme gefordert werden kann. Für die kontinuierliche Messung, haben sämtliche Tagesmittelwerte die festgelegte Konzentration und alle Halbstundenmittelwerte das Zweifache der genehmigungstechnisch festgesetzten Emissionsbegrenzungen, nicht zu überschreiten (Nummer 2.7). Dieser Schwellwert des TVOC stellt für die Schredderbetreiber eine echte Herausforderung dar. Da Nummer 5.4.8.9.1 jedoch explizit an dieser Stelle eine diskontinuierliche Messung fordert, sind die Kontinuitätsmessungen für Schredder vorerst nicht relevant.

Nummer 3.5.5.3 der TA Luft regelt die Form der Nachweispflicht gegenüber den Behörden. Die errechneten und validierten Halbstundenmittelwerte sind mit den dazu gehörigen Statussignalen abzuspeichern und in Bezug auf die tägliche Betriebszeit, für jeden Kalendertag zu einem Tagesmittelwert zu kumulieren. Die Auswertungen eines Kalenderjahres sind an die zuständigen Behörden innerhalb von drei Monaten, nach Ablauf des Jahres zu übermitteln. Die Speicherung der Messergebnisse ist einschließlich der Aufzeichnungen der Messgeräte auf fünf Jahre festgelegt. Dieser Umstand ist durch eine direkte telemetrische Übermittlung der Datenauswertung an die Behörden zu umgehen. Auf eine Dauermessung und die daran gebundenen Aufwände kann dann verzichtet werden, wenn die fortlaufende Feststellung der Wirksamkeit von Einrichtungen zur Emissionsminderung gewährleistet ist.

### **6.3.5 Anlagen- und Betriebsgenehmigung**

Emissionsrechtliche Anforderungen im Genehmigungsverfahren werden durch die Nummer 5.1.2 dargestellt. Diese Passage gehört eigentlich in den Emissionsteil der hier durchgeführten Analyse. Da die Forderungen allerdings direkt an den Prozess der Genehmigung gebunden sind, werden sie in diesem Abschnitt der Arbeit diskutiert. Die Nummer 5.1.2 sieht vor, dass alle unter Nummer 5 gelisteten Anforderungen im Genehmigungsbescheid für jede einzelne Emissionsquelle, luftverunreinigenden Stoff oder Stoffgruppe festgeschrieben werden. Im Falle einer Abgaszusammenführung aus mehreren Quellen, sind die emissionsbegrenzenden Anforderungen so im Bescheid festzulegen, dass die Gesamtemission aus der Zusammenführung nicht größer ist, als ein einzelner Abgasstrom dieser

Summenbildung. Die Einhaltung eines bestimmten Massenstroms bzw. Begrenzung einer Massenkonzentration ist ebenfalls im Genehmigungsbescheid der Schredderanlage zu hinterlegen (siehe auch Emissionsquellenverzeichnis der BVT 3).

Mit den obigen Rahmenbedingungen ist die Analyse der Nummer 5.4.8.9.1 zur Behandlung von nicht gefährlichen metallischen Abfällen in Schredderanlagen betrieblich und emissionstechnisch abgeschlossen. Aus der Genehmigung solcher Anlagen heraus, ergeben sich im Immissionsteil der TA Luft jedoch Forderungen an Kenngrößen, die bezugnehmend auf das hier erarbeitete Systemkonzept und das BREF nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Auf negative Umwelteinwirkungen durch die Deposition von Schadstoffen geht die Tabelle 8 ein. Hier wird die Entwicklung der Depositionswerte (für Schredderanlagen) in der TA Luft-Entwurfsphase von 2002 bis 2018 verdeutlicht. Mit Ausnahme der Einbindung von Benzo(a)pyren (B(a)P) [55] und den PCDD/F entsprechen die Depositionswerte (Nummer 4.5.1) weiterhin den Grenzen der TA Luft 2002, obwohl der Wert für Pb zwischenzeitlich auf  $40 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  und für Cd auf  $1 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  herabgesetzt wurde.

**Tabelle 8: TA Luft Entwicklung der Depositionswerte**

Stoff-/ Stoffgruppe	Grenzwert 16. Juli 2018	Grenzwert 18. Juni 2015	Grenzwert 24. Juli 2002
As	$4 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$4 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$4 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Pb	$100 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$40 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$100 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Cd	$2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$1 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Ni	$15 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$15 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$15 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Hg	$1 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$1 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$1 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Tl	$2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
B(a)P	$0,5 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$0,5 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	-
PCDD/F, dl-PCB	$9 \text{pg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$9 \text{pg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	-
Cr	-	$16 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	-

An den immissionsrechtlichen Ansatz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen wird auch durch die Auslegung der zulässigen Bagatellmassenströme in Nummer 4.6.1 angeknüpft. Im Vergleich zur TA Luft 2002 haben sich die Werte für Bagatellmassenströme in der Novelle stark verschärft (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: TA Luft Entwicklung der Bagatellmassenströme**

Schadstoff/-gruppe	Grenzwert 16. Juli 2018	Grenzwert 24. Juli 2002
As	0,0016 kg/h	0,0025 kg/h
B(a)P	0,00026 kg/h	0,0025 kg/h
Benzol	0,05 kg/h	0,05 kg/h
Pb	(anorganisch) 0,025 kg/h	0,025 kg/h
Cd	0,0013 kg/h	0,0025 kg/h
Cr	0,025 kg/h	-
Fluor (F)	0,018 kg/h	0,15 kg/h
Ni	0,0052 kg/h	0,025 kg/h
Hg	0,0013 kg/h	0,0025 kg/h
Schwefeldioxid	1,4 kg/h	20 kg/h
Staub (PM 10)	0,8 kg/h	1 kg/h
Stickstoffdioxid	1,6 kg/h	20 kg/h
Tetrachlorethen	(anorganisch) 0,5 kg/h	2,5 kg/h
TI	0,0026 kg/h	0,0025 kg/h
PCDD/F, dl-PCB	3,5 µg/h	-

Unter der Voraussetzung, dass die Bagatellmassenströme in Summe eingehalten werden, kann auf den Nachweis von Depositionswerten als Teil der Gesamtzusatzbelastung (Immissionen) verzichtet werden. Für Großschredderanlagen, speziell ohne direkte Entstaubungseinheit an der Mühle, ist das sehr unwahrscheinlich.

Im Falle einer Überschreitung fordert die TA Luft die Untersuchung der Anlagenvorbelastung. Infolgedessen muss geklärt werden, welche Zusatzbelastung durch die Anlagenerweiterung bzw. -änderung generiert wird. Aus der Vor- und Zusatzbelastung ergibt sich schließlich die Gesamtbelastung an den Emissionsaufpunkten, welche mit den geforderten Grenzwerten abzugleichen ist. Bei einer weiteren Überschreitung dieser, sind zunächst zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsminderung einzuleiten, gefolgt von einer schadstoffabhängigen Sonderfallprüfung im Falle einer erfolglosen Emissionsreduzierung durch die genannten Maßnahmen.

Im Zuge einer Neu- oder Änderungsgenehmigung von Schreddern muss zukünftig davon ausgegangen werden, dass der Nachweis einer Gesamtzusatzbelastung von den Behördenvertretern regulär eingefordert wird. Wobei bei der Ermittlung der Massenströme die Emissionen der gesamten Anlage einzubeziehen sind.

Staubdepositionsmessungen sind i.d.R. keine regelmäßige Messverpflichtung und gehören damit lediglich in den immissionstechnischen Nachweisbereich der Anlagengenehmigung.

Eine weitere Neuerung zu der sich ändernden Genehmigungslage, findet sich unter der Nummer 3.5 in der Prüfung der Anträge auf die Erteilung einer Änderungsgenehmigung (Anzeigeverfahren). In Anbindung an § 16a BImSchG bedarf die störfallrelevant erstmalige Unterschreitung oder Verringerung des angemessenen Sicherheitsabstands zu benachbarten Schutzobjekten, der Genehmigung. Eine Genehmigung kann untersagt werden, wenn diese störfallrelevante Änderung der Erfüllung einer nachträglichen Anordnung nach § 17 BImSchG dient. Die Entwurfsfassung der TA Luft spezifiziert diese Änderungen in Form von Verbesserungsmaßnahmen wesentlich in der Nummer 3.5.4, in dem sie bei der Festlegung zulässiger Immissionswerte einen direkten Bezug auf das BImSchG und die Einzelfallentscheidungen nach Nummer 4.8 nimmt. Der ursprüngliche Interpretationsspielraum für Verbesserungsmaßnahmen ist dadurch eingeschränkt. Speziell für Sicherheitsabstände ist diese Klausel im Anwendungsfall irrelevant, weil Schredderbetriebe i.d.R. keine Störfallanlagen darstellen.

Für den Fall einer Neugenehmigung ordnet die Novelle mit der Nummer 3.6 die Prüfung der Betriebsorganisation des Antragsstellers an. Vor der Erteilung einer offiziellen Genehmigung ist zu kontrollieren, ob die Betriebsorganisation des Antragsstellers geeignet erscheint den Betreiberpflichten des § 5 BImSchG und den unter § 7 BImSchG erlassenen Verordnungen nachzukommen. Durch diese Klausel müssen Aufbau- und Ablauforganisation des Schredders bereit im Genehmigungsverfahren dargelegt werden. Die geforderten Informationen erstrecken sich dabei auf die Darstellung

- der Aufbauorganisation in Form einer Organisationsstruktur des Betriebes und seiner Verantwortlichkeiten,
- der Ablauforganisation (Verfahrensabläufe),
- eines Instandsetzungsplans,
- der Überwachung von Emissionen und Energieverbräuchen inklusive
- eines Maßnahmenplans zur Verbesserung der Energieeffizienz,
- der Organisation von Interventionsmaßnahmen bei Emissionsüberschreitung und Störungen sowie
- der Dokumentation aller umweltrelevanten Ereignisse.

Bei einer kompletten Neugenehmigung stehen zum Zeitpunkt der Genehmigungsbeantragung diese Parameter regelmäßig noch nicht fest, zumindest im Detail. Übergeordnet kommt dieser Abschnitt den Forderungen des BREF nach einem UMS nach (speziell BVT 1 und 3).

Alternativ kann der Nachweis einer entsprechenden Betriebsorganisation auch durch die Zertifizierung nach ISO 14001 erbracht werden. Die Eignung alternativer Zertifizierungssysteme bspw. EfbV, muss im Einzelfall durch die zuständigen Behörden freigegeben werden. Voraussetzung ist, dass diese Systeme verbindlich eine Überprüfung durch eine unabhängige Stelle vorsehen. Zertifizierungen werden damit nicht zur Pflicht, ersetzen aber die Detailprüfung der Behörden. Wenn auch der Absatz aus dem Referentenentwurf vom 29. Mai 2015 gestrichen wurde, sollte im aktuellen Entwicklungsstand bereits davon ausgegangen werden, dass zusätzliche Zertifizierungen wie die ISO 50001 für Schredderanlagen, gefordert werden können.

Bestandsanlagen sind innerhalb der Sanierungsfrist der TA Luft in fünf Jahre nach Inkrafttreten der novellierten TA Luft, an den ausgeführten Stand der Technik von Neuanlagen heranzuführen [53], wobei die Vorgaben der TA Luft im Falle einer wesentlichen Änderungsgenehmigung nach § 16 BImSchG umgehend zum Tragen kommen. Entsprechende Zeitvorgaben zur Anwendung der BVT-Schlussfolgerungen befinden sich in § 7 BImSchG. Hier hat im Hinblick auf bestehende Anlagen, die Überprüfung und ggf. Anpassung der nationalen Rechtsverordnung binnen eines Jahres nach Veröffentlichung der BVT-Schlussfolgerungen zu erfolgen. Innerhalb von vier Jahren ist dann sicherzustellen, dass die Bestandsanlagen die Emissionswerte der überarbeiteten Rechtsverordnung einhalten. Diese Konstellation bedeutet schlussendlich einen wesentlich höheren Verwaltungs- und Genehmigungsaufwand, auch für Schredderbetreiber. Das Risiko einer Anlagenerweiterung durch bspw. die Verbesserung der Ablufttechnik, kann im Einzelfall zu einer operativen und verfahrenstechnischen Neuauslegung des Gesamtbetriebes oder seiner Stilllegung führen.

## **6.4 Fazit zum Umweltschutz an Schredderanlagen**

Das BREF für Großschredderanlagen besteht aus einer Sammlung von verfahrenstechnischen, baulichen und organisatorischen BVT. Die BVT-Schlussfolgerungen enthalten mehr Vorgaben, als reine Emissionswerte für den Anlagenbetrieb. Für die Vollzugsbehörden ist diese rechtsformelle Schrift von besonderer Bedeutung, da sie gemäß IED als Referenzdokument für die Festlegung von Genehmigungsaufgaben u.a. von Schreddern dienen soll [9].

Sowohl das BREF, als auch die TA Luft fordern ein umfassendes UMS, das zum einen das Abfall- und Stoffstrommanagement, zum anderen den emissions- und immissionsüberwa-



chenden Anforderungsbereich, organisatorisch ausbaut. Ergänzt wird das UMS des Weiteren durch bauliche und sonstige betriebliche Anforderungen, deren Formulierungen eine sehr hohe Detailtiefe aufweisen und die in ihrer Ausführung eine Überschneidung mit anderen etablierten Verordnungen bewirken. Die Betriebsführung einer Schredderanlage wird so zukünftig wesentlich komplexer.

In der aktuellen Entwurfsfassung grenzt die TA Luft teilweise an einen behördlichen Gegenentwurf zur VDI-Richtlinie 4085, welcher im direkten Vergleich mit dem BREF als europäischem Standard, zu einer Wettbewerbsverzerrung unter den Großschredderbetreibern führen dürfte [56].

Die TA Luft und BVT-Schlussfolgerungen sind im Kontext der Weiterentwicklung von Schredderanlagen unter dem Einfluss umweltrechtlicher Änderungen, in ihrer Gesamtheit zu berücksichtigen. Die folgenden Matrizen in Tabelle 10 und Tabelle 11 fassen die ausgewerteten Forderungen und Regelungen des BREF und der TA Luft Novellen aus den Unterkapitel 6.2 und 6.3 dieser Arbeit in einer Tabellenstruktur zusammen und können als Leitfaden für die Bewertung von Bestandsanlagen sowie deren Neuplanung angewendet werden.

**Tabelle 10: Zusammenfassung BREF-relevanter Forderungen für Schredderanlagen**

BVT	Kapitelbeschreibung Schredder	Verbindung zum BVT-Merkblatt (Kapitel)	Seite BVT Schluss- folgerung	Seite BVT- Merkblatt
BVT 1	Einführung und Anwendung eines UMS	2.3.1.1	L 208/45	718
BVT 2	Abfall- und Stoffstrommanagement	2.1.1 - 2.1.7, 2.3.2.1 - 2.3.2.9	L 208/47	719
BVT 3	Einführung eines Emissionsquellenverzeichnisses	2.3.1.2	L 208/48	720
BVT 4, 21	Optimierung der Lagerwirtschaft	2.3.13	L 208/49	721
BVT 5	Verringerung des Materialumschlags	2.3.13	L 208/49	722
BVT 6, 7, 19, 20	Überwachung von Emissionen in Gewässer	2.3.3.1, 2.3.3.2, 2.3.11, 3.1.2.2	L 208/50	722
BVT 8, 25	Überwachung gefasster Emissionen in die Luft	2.2.2, 2.3.3.4., 3.1.2.1.ff	L 208/52	726
BVT 11	Überwachung des Energie- und Ressourcenverbrauchs	3.1.3.3	L 208/55	728
BVT 14	Technische Maßnahmen zur Vermeidung diffuser Emissionen in die Luft	2.2.2, 2.3.4.1 - 2.3.4.11, 2.3.5.3, 2.3.5.4. 3.1.3, 7.2.1	L 208/56	730
BVT 26, 27	Vermeidung von Emissionen durch Unfälle und Ereignisse (Verpuffungen)	3.1.2.1, 3.1.3, 3.3.1	L 208/69	743
BVT 15, 16	Abfackeln von Prozessgas	2.3.5.5	L 208/58	731
BVT 17, 18	Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von Lärmemissionen und Erschütterungen	2.3.10, 3.1.2.3, 3.1.3.2	L 208/59	732
BVT 22, 23, 24, 28	Recyclingmaterial-, Energie- und Ressourceneffizienz	2.3.8, 2.3.9, 2.3.12, 3.1.2.4	L 208/67	740

**Tabelle 11: Zusammenfassung TA Luft-relevanter Forderungen für Schredderanlagen**

Nummer	Kapitelbeschreibung Schredder	Verbindung innerhalb der TA Luft	Verbindung mit BVT- Schlussfolgerung	Seite TA Luft
3.6	Prüfung der Betriebsorganisation	5.1.2, 5.2.11.2	BVT 1, 3	23
4.6.1	Ermittlung der Immissionskenngrößen	3.5.1, 3.5.2, 3.5.4, 4.6.1.1, 4.7, 4.8	-	37
5.1.1	Vorgaben zur Umsetzung der BVT-Schlussfolgerungen	-	-	54
5.1.2	Berücksichtigung der Anforderungen im Genehmigungsverfahren	-	BVT 3	56
5.2.1	Gesamtstaub	-	BVT 25	61
5.2.2	Staubförmige anorganische Stoffe	4.5.1, 5.2.7.1.1	BVT 25	61
5.2.3.2	Be- oder Entladen	-	BVT 2	65
5.2.3.3	Förderung oder Transport	-	BVT 5	67
5.2.3.4	Bearbeitung oder Aufbereitung	-	BVT 2	68
5.2.3.5	Lagerung	-	BVT 4	68
5.2.3.6	Besondere Inhaltsstoffe	5.2.3.2 - 5.2.3.5	-	69
5.2.5	Organische Stoffe (TVOC)	-	BVT 8	71
5.2.7	Karzinogene, keimzellmutagene oder reproduktionstoxische Stoffe sowie schwer abbaubare, leicht anreicherbare und hochtoxische organische Stoffe	4.5.1, 5.2.7.2, 5.2.7.1.1	BVT 8	83
5.2.11	Energie und Einsatzstoffe	5.2.11.1 - 3	BVT 11, (22), 23, 28	91
5.3.2	Einzelmessungen	2.7, 5.3.5	BVT 8	94
5.3.3	Kontinuierliche Messungen	2.7, 5.2.5, 5.3.3.2, 5.3.3.5, 5.3.5	BVT 8	98
5.4.8.9.1	Anlagen zur Behandlung von nicht gefährlichen metallischen Abfällen in Schredderanlagen	5.1.3, 5.2.1 - 5.2.3.ff., 5.2.11.ff, 5.3.2, 5.2.5	BVT 2, 4, 5, 14, 25, 26, 28	359
5.4.8.12	Anlagen zur zeitweiligen Lagerung von Eisen- oder Nichteisenschrotten, einschließlich Autowracks	Nr. 5.2.3.5.2	BVT 4, 14	378

Die organisatorischen, verfahrens- und messtechnischen Änderungen auf nationaler und internationaler Ebene, sind mit einer nicht unerheblich zusätzlichen Kostenbelastung verbunden, welche Anlagenbetreiber i.d.R. nicht direkt auf den Markt umgelegt bekommen. Der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE) prognostiziert den monetären Aufwand für die ca. 40 in Deutschland erfassten Großschredderanlagen, im Bereich der Ablufttechnik auf über 1 Millionen EUR je Anlage [56]. Über den finanziellen Aspekt hinaus (hier primär Investitionskosten an Produktionsanlagen genannt), werden sich laut BDI, speziell die Verschärfungen der TA Luft, negativ auf den Zeitverlauf von (Änderungs-)Genehmigungsverfahren auswirken [57].

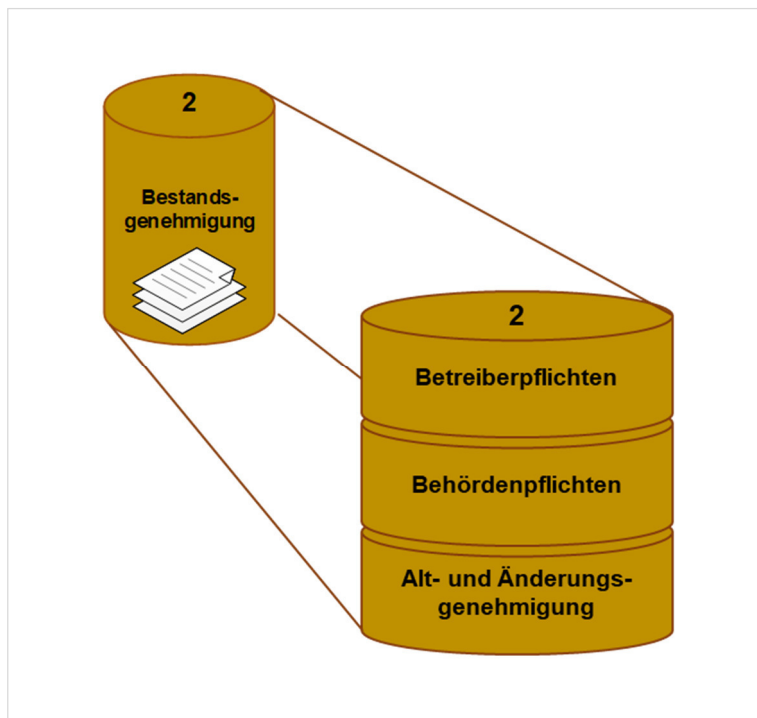
Inwiefern die umweltschutzrechtlichen Änderungen an Schreddern negativ ins Gewicht fallen, hängt schlussendlich von den individuellen Maschinenausführungen ab und muss für jeden Betrieb separat bewertet werden.

Das neue Anforderungsprofil für Schredder (Kapitel 8.2.3) und die konzeptgebundene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 9.3) verdeutlichen, dass die bezifferten Aufwendungen unter strenger Implementierung der rechtlichen Rahmenbedingungen, bei Weitem nicht ausreichen.

## **6.5 Säule 2: Bestandsgenehmigung**

Als Folge der rechtlichen Änderungen und in Verbindung mit den in Kapitel 2.4 und 2.5 genannten Betreiber- und Behördenpflichten, dient dieses kurze Unterkapitel der Beschreibung des zweiten Kerneinflussfaktors im hier entwickelten Systemkonzept.

Abbildung 17 stellt die Säule 2 als formalrechtlich festgelegte Beziehungsebene der Schredderbetreiber und Behörden systematisch dar. Um den rechtlichen Teil dieser Arbeit nicht zu stark ins Gewicht fallen zu lassen, wird auf eine ergänzende Ausführung der ersten beiden Bausteine an dieser Stelle verzichtet. Inhaltlich sind sie durch die Informationen der Einführungskapitel 2.5 und 2.6 abgegolten.



**Abbildung 17: Säule 2: wesentliche Systembausteine in der Evaluation der Genehmigungslage**

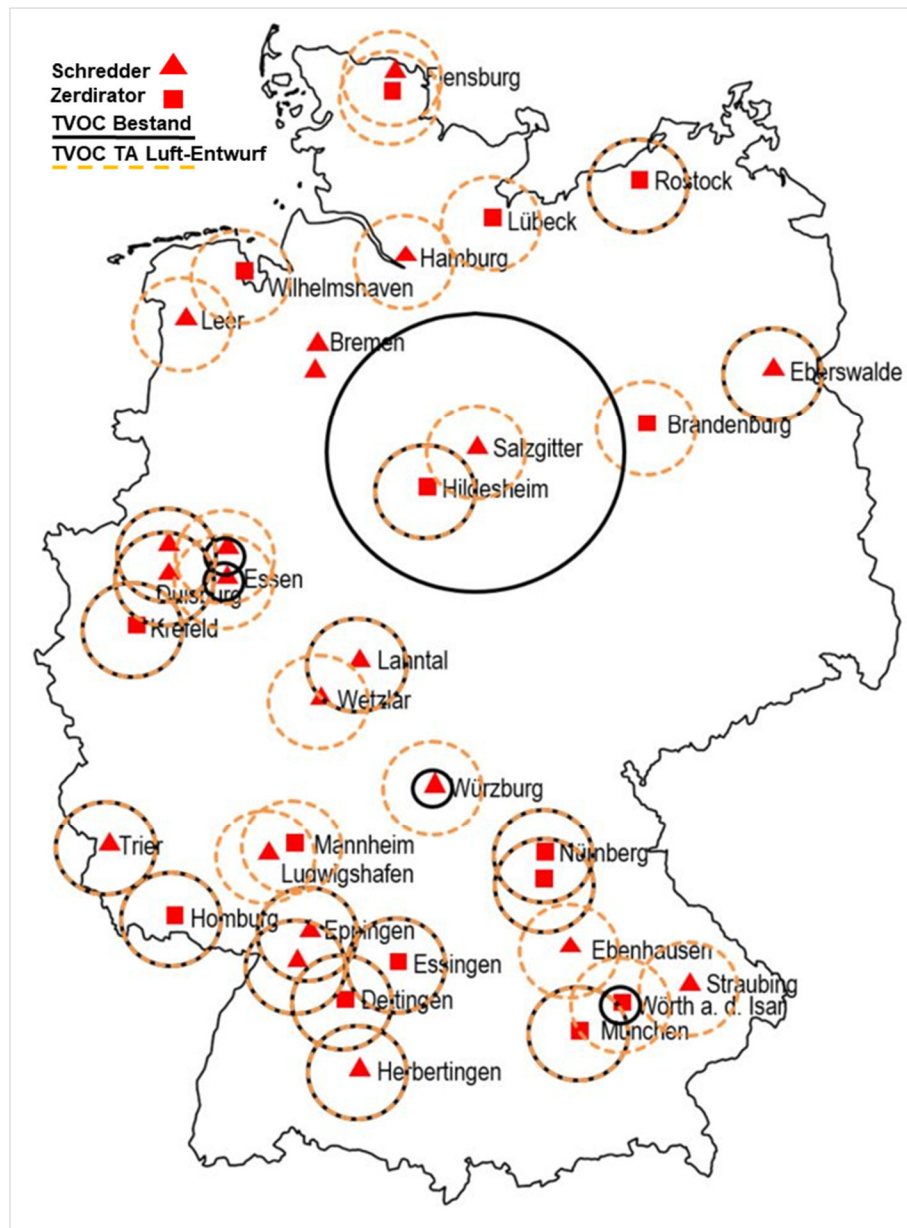
Auf Grundlage der u.a. hier analysierten rechtlichen Änderungen und Forderungen zur Anlagengenehmigung (speziell Kapitel 6.3.5), sind Betreiber von IED-Anlagen dazu angehalten, einen Abgleich ihrer Nebenbestimmungen mit dem neuen umweltschutzrechtlichen Rahmenbedingungen dann vorzunehmen, wenn eine wesentliche Anpassung der Bestandstechnik als Folge des Nichteinhaltens neuer Grenzwerte in Erwägung gezogen wird oder eine Erweiterung der Bestandstechnik geplant ist und diese u.U. zusätzliche Umweltauswirkungen nach sich zieht (dritter Baustein).

Die Säule 2 versteht sich im Rahmen des Systemkonzepts als ein planerischer Vor- bzw. Kontrollfilter und bildet einen Teil der Entscheidungsfindung über die Weiterentwicklung des Anlagenbestands unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen.

Die Verschiedenartigkeit von Entsorgungsanlagen, standortabhängige Parameter, Behördennähe (siehe auch Kapitel 10) und die Komplexität ihrer rechtlichen Rahmenbedingungen, tragen Sorge dafür, dass kein einheitlicher landesweiter Standard für den inhaltlichen Aufbau von Genehmigungsbescheiden an Schredderanlagen existiert. Eine Untersuchung von spezifischen Nebenbestimmungen diverser TSR-Bestandsgenehmigungen bestätigt dies. Somit können an dieser Stelle keine allgemeingültigen Empfehlungen zum Vorgehen im Bestandsabgleich formuliert werden.

Die Untersuchung von 39 IED-Schredderanlagen und ihrer Bestandsgenehmigungen in 2017 hat gezeigt, wie sich die neuen Grenzwertbestimmungen (hier untersucht wurden Gesamtstaub und TVOC) auf den Fortbestand der technischen Einrichtungen auswirken können. Die Datenerhebung ist das Ergebnis einer überregionalen Anfrage bei den zuständigen Ministerien der Länder sowie den Betreibern selbst.

Unter der Annahme, dass bis dato keine technischen Anpassungen der Abgassysteme vorgenommen worden sind (Stand 15. Dezember 2019,) stellt die Übersicht in Abbildung 18 den theoretischen Änderungsaufwand für die selektierten Schredder in Deutschland dar.



**Abbildung 18: Theoretischer Einfluss der TVOC-Grenze von 50 mg/Nm<sup>3</sup> auf den Genehmigungsstand von Schreddern im Jahr 2017 in Deutschland in Anlehnung an [24]**

Nach interner Bereinigung der Daten, bleiben 36 Anlagen für eine Auswertung bestehen. Die weichere Obergrenze von 10 mg/Nm<sup>3</sup> Gesamtstaub, deckt sich bei 25 Schredder nicht mit den Grenzwerten der Nebenbestimmungen. Bei einer Grenzwertverschärfung im Sinne des TA Luft-Entwurfes in Nummer 5.4.8.9.1 (Kapitel 6.3.2) um 5 mg/Nm<sup>3</sup>, bestünde für 34 der betrachteten Anlagen ein Handlungsgebot.

Gemäß der Kartenübersicht in Abbildung 18, liegen nur vier Schredderanlagen entsprechend ihrem Genehmigungsbescheid unterhalb der 50 mg/Nm<sup>3</sup>-Grenze für die zulässige TVOC-Belastung. Für die restlichen Anlagen deckt sich der Grenzwert mit den Bestandsbestimmungen, unterschreitet diese oder legt sie erstmalig in den Nebenbestimmungen fest.

Auf Grund der Drittquellenbindung, können Fehler in der vorliegenden Datenevaluation nicht ausgeschlossen werden. In diesem Sinne erhebt die Auswertung weder Anspruch auf Vollständigkeit, noch validiert sie, dass die eingereichten Informationen und Nebenbestimmungen inhaltlich korrekt sind und/oder dem aktuellen Genehmigungsstand entsprechen. Unter Einbindung der messtechnischen Analysen des Kapitels 7 und der Interpretation der (neuen) formalrechtlichen Randbedingungen aus Kapitel 6 in u.a. Kapitel 8, wird sich zeigen, dass die Auswirkungen des BREF und der TA Luft-Novelle weitaus tiefgreifender sind, als in diesem theoretischen Ansatz aufgezeigt.

## 7 Abluftmessungen an Schredderanlagen

Das folgende Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Auswertung von emissions- und immissionstechnischen Messerhebungen an Schredderanlagen der TSR Gruppe der letzten 43 Jahre. Im Rahmen dessen, liegt der Fokus des Kapitels primär auf der Analyse emissionsseitiger Ergebnisberichte in Verbindung mit den geläufigen Inputströmen am Schredder. Aus der Prämisse des dargelegten Systemkonzepts heraus, wird dieses Kapitel der Säule 3 zugeschrieben.

### 7.1 Säule 3: Emissionsgrenzwerte und Messungen

Die dritte Säule des Modells bildet sich aus drei Phasen, wie durch Abbildung 19 ausgelegt.

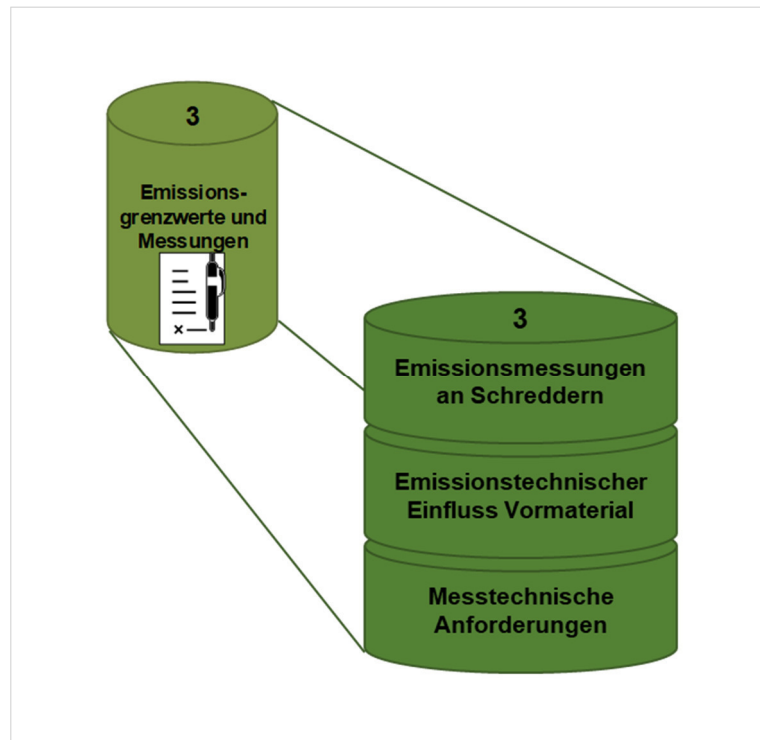


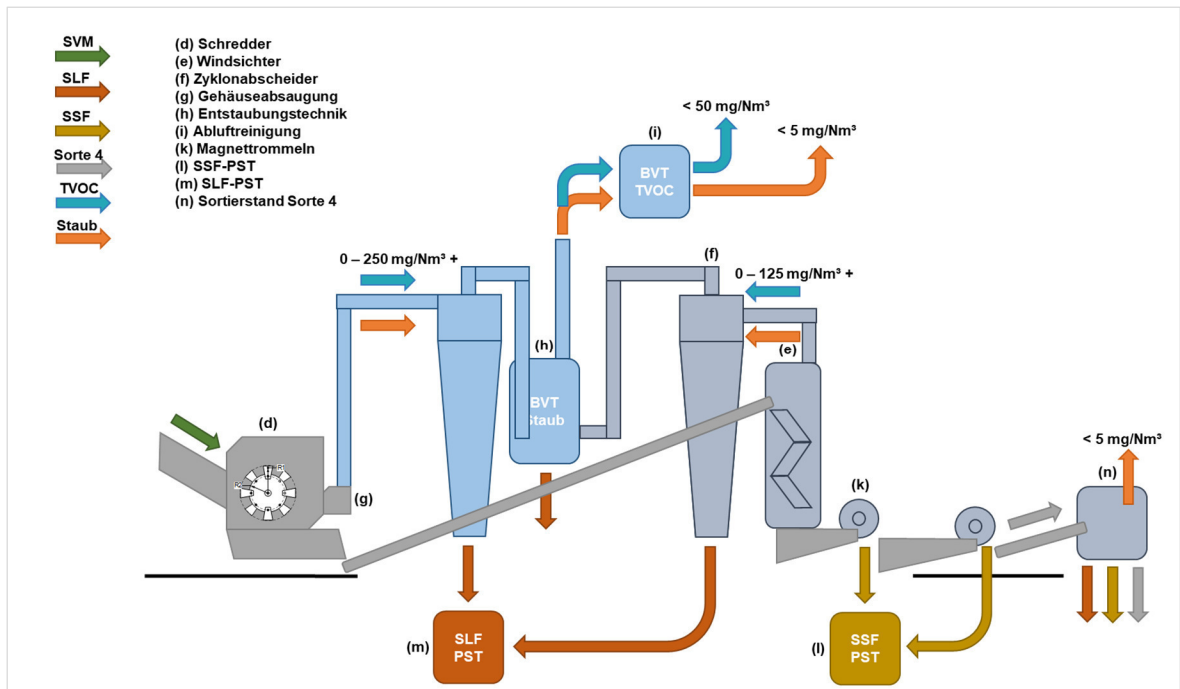
Abbildung 19: Säule 3: wesentliche Systembausteine in der Beschreibung der Messtechnik

Der erste Teil der Analyse steigt in die Messhistorie der TSR ein und veranschaulicht die dokumentierte Emissionsbandbreite an Schreddern. In Zuge dessen wird erörtert, ob auf Basis der gelieferten Daten eine Korrelation zwischen den verarbeiteten Vormaterialien und der Konzentration im gemessenen Roh- und/oder Reingas abgeleitet werden kann und ob der Wirkungsgrad verschiedenster Abgasreinigungssysteme, aus dem Vergleich der gelieferten Prozess- zu Reingaswerte, erkennbar ist. Die Rückkopplung dieser Erkenntnisse soll



helfen, eine Aussage über den Effekt der verschiedenen Inputsorten auf die Abluft des Schredders zu treffen und diese in die neue Verfahrenstechnik sowie Datenerhebung prozessverbessernd einzubinden. Weiter wird festgelegt, wie Emissionsmessungen für den Schredderbetreiber in der Zukunft noch aussagekräftiger gestaltet werden können.

## 7.2 Messtechnik an Schredderanlagen



**Abbildung 20: Wesentliche Emissionsquellen an Schredderanlagen und geforderte Grenzwerte gemäß TA Luft-Novelle**

Abbildung 20 zeigt in Anlehnung an Abbildung 6 des technischen Grundlagenkapitels, den Konzentrationsverlauf von Staub- und TVOC-Emissionen an Schredderanlagen in die Luft und unter Berücksichtigung des Materialstroms auf.

Die Mühle stellt im obigen Prozessausschnitt die Primärquelle der Emissionen dar. Die nachgeschalteten Windsichter-, Entstaubungs- und Abgasreinigungstechniken (e, h, i) bewirken die erforderliche Schadstoffreduktion in der Prozessluft. Für den Sortierstand (n) sind ebenfalls Staubemissionsgrenzwerte vermerkt. Die Messung der Emissionswerte erfolgt stationär bzw. quellgebunden und/oder i.d.R. im Ausgang der Abluftreinigungseinrichtung.

Die zeitlich begrenzte, stichprobenartige Erfassung des Emissionsverhaltens von Schredderanlagen ist weitaus geläufiger, als die mit einem wesentlich höheren messtechnischen

Aufwand verbundene kontinuierliche Emissionsüberwachung. Wobei anzumerken ist, dass Einzelmessungen nur bedingt ein repräsentatives Bild des kontinuierlichen Emissionsverhaltens der Betriebseinheiten widerspiegeln.

Die wesentlichen Messaufgaben, die sich aus den gesetzlichen Vorgaben für Schredder ergeben, werden in den Kapitel 6.2 und 6.3 geliefert. Unter Einbindung der genannten Betreiber- und Behördenpflichten wird deutlich, dass sich die Anlässe bzw. Motive für die Abluftmessung an Schredderanlagen wesentlich unterscheiden, aber normgerecht geregelt sind.

Die unterschiedlichen Anlässe für die Durchführung von diskontinuierlichen Emissionsmessungen sind in der VDI-Richtlinie 2448 Blatt 1 hinterlegt. Neben den klassischen Abnahmemessungen als Garantienachweis, sind hier auch die Messungen im Rahmen der Eigenüberwachung und Ursachenanalyse aufgeführt. Diese schließen auch Messungen zur Prognose des Emissionsverhaltens unter verschiedenen Betriebszuständen, z. B. nach einer Verfahrensumstellung, bei Betriebsstörungen oder bei Kapazitätserweiterungen mit ein. Besonders im gegenwärtigen Anwendungsfall ist die Interpretation der gelieferten Messergebnisse für die Ursachenanalyse relevant, wenn auch der ursprüngliche Auslöser dieser Messungen rückwirkend ein anderer gewesen sein kann [16].

Die korrekte Planung der Einzelmessungen ist für eine erfolgreiche, anlassbezogene Informationsermittlung essentiell und wird ergänzend zu der VDI-Richtlinie 2448 Blatt 1 über die europäische Norm DIN EN 15259 geregelt. Der dort hinterlegte Messplan enthält die Formulierung der Messaufgabe und die entscheidende Strategie, die entsprechend der Messaufgabe geforderten Informationen zu generieren [16].

Die Durchführung der Messungen erfolgt dann gemäß den emissionsrechtlichen Bestimmungen, unter Berücksichtigung der anlagenspezifischen Betriebszustände und Definition der Abgasrandbedingungen, für jeden Schredder individuell. Ähnliche Randbedingungen ergeben sich für die immissionstechnische Bewertung von Luftverunreinigungen (bspw. VDI-Richtlinie 4320 Blatt 2 für Staubdeposition). Für den weiteren Verlauf dieses Kapitels sind weniger die verwendeten Messmethoden und ihre Normkonkretisierung, als vielmehr die ermittelten Messergebnisse relevant.

### **7.3 Messhistorie an Schredderanlagen der TSR**

Im Zeitraum 1974 bis 2017 wurden bei der TSR und ihren Tochtergesellschaften über 87 Messprojekte zur Bewertung von Luftemissionen und -immissionen an 14 Schredderanlagen in acht Bundesländern Deutschlands durchgeführt und entsprechend protokolliert. Die

besagten Messprojekte sind in 183 Messprotokollen unterteilt. Die in den Messprotokollen aufgeführten Einzelwerte gehen damit in die Zehntausende. Von den 14 betrachteten Schredderanlagen mit einem Leistungsspektrum von 500 bis 4.420 kW Antriebsleistung und einem Durchsatz von 35 bis 180 t/h, sind heute nur noch Sechs in Betrieb. Damit schließt die Datenevaluation die anderen sieben der insgesamt 13, ebenfalls noch aktiven Schredderanlage der TSR Gruppe in Deutschland, Belgien, Holland und England aus. Die Tabelle 12 und Tabelle 13 fassen die wesentlichen Randbedingungen der Messprotokolle in einer Auflistung für Emissions- und Immissionsmessungen zusammen.

**Tabelle 12: Auszug von Emissionsmessungen der TSR Gruppe 1974 bis 2017**

Messplanung	Untersuchungsgegenstand	Anzahl
Messung	Emissionsmessung	156
Messobjekt	TVOC	110
	Benzol	16
	Gesamtstaub	119
	Asbest	26
	PCB (auch PCDD/F)	21
Messort	Abluft Schredder (Sichtung- und Entstaubung)	144
	Abluft Separier- und Siebanlagen	12
Sorten	Komplette Bandbreite an Inputsorten	12

Die Auswertung der hinterlegten Daten ist nach Standorten gestaffelt und damit zeitlich randomisiert. Die Messwertevaluation in den Kapiteln 7.3.1 und 7.3.3 folgt weder einer zeitlichen Chronologie, noch lassen sich die Einzelpositionen in der dargestellten Form, durch Dritte, spezifischen Schredderanlagen zuordnen. Dieses Vorgehen folgt den Anforderungen des TSR-Sperrvermerks. Die 27 erfassten und ausgewerteten Immissionsprotokolle (Tabelle 13) stellen keinen Schwerpunkt in der nachfolgenden Datenevaluation dar.

**Tabelle 13: Auszug von Immissionsmessungen der TSR Gruppe 1974 bis 2017**

Messplanung	Untersuchungsgegenstand	Anzahl
Messung	Immissionsmessung	27
Messobjekt	Staubniederschlag	27
	A-Staub	11
	E-Staub	11
	Schwebstaub PM10	6
Messort	Betriebsgelände (auch Arbeitsplatz und Umgebung)	27
Sorte	Mischschrott	1

Damit verbleiben 156 Messprotokolle für die Auswertung der gemessenen Emissionen am Schredder. Eine statistische Auswertung der karzinogenen organischen Inhaltsstoffe wie PCB, PCDD/F und Benzol entfällt. Auf Grund der Fülle an Einzelwerten wird auf eine ausführlich massenbilanzierte Darstellung der Staubinhaltsstoffe verzichtet, sodass sich die hier geführte Analyse auf den historisch gemessenen Gesamtstaub und den TVOC in der Luft beschränkt. Eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Staubinhaltsstoffe findet sich im Anschluss an die genannte Historie in Kapitel 7.3.2.

Die Auswertung der einzelnen Messprotokolle zeigt, dass die Beschreibung der im Zuge der Emissionsmessungen verarbeiteten Stoffströme auf die reine Sortennennung begrenzt ist. Eine differenzierte Massenerhebung der Zusammensetzung des Vormaterials bleibt in allen Messprojekten aus. Des Weiteren fällt auf, dass die Nomenklatur der dokumentierten Inputströme nur teilweise der Sortenführung im heute etablierten Warenwirtschaftssystem entspricht. Dieser Umstand dürfte in den genehmigungstechnischen Anlässen der Messungen begründet liegen. Da ein Großteil der Messungen im Rahmen von Neugenehmigungen, Anlagenerweiterungen oder der laufenden Nachweisführung gemäß Nebenbestimmungen, und nur in wenigen Fällen zur Eigenüberwachung oder Potentialanalyse durchgeführt wurde, ist die Dokumentation der verarbeiteten Inputsorten und Mengen nicht weiter spezifiziert. Messungen zur Einhaltung von Nebenbestimmungen müssen betriebstypisch in Phasen der höchsten Emissionen durchgeführt werden. Einige Betriebszustände scheiden damit für die dokumentierten Messungen aus.

Außerdem muss berücksichtigt werden, dass ortsbedingte oder saisonale Eigenschaften bzw. Effekte einer Inputsorte nur dann im Zuge der hier geführten Analyse sinnvoller Weise einer Betrachtung verdienen, wenn die Messplanung in den Einzelprojekten entsprechend übereinstimmt und die Sortenspezifikationen über die notwendige Detailtiefe verfügen. Das ist allein auf Grund des Alters einiger Daten schon nicht der Fall.

Infolgedessen werden die Protokolle unter Zuhilfenahme des standorttypischen Sortenkatalogs bereinigt. Die 29 Ursprungssorten werden so in zwölf Sortenbezeichnungen zusammengeführt. Unter Annahme ähnlicher Mischungsverhältnisse in der Zusammensetzung und der daraus resultierenden Schadstoffverteilung bzw. dem Emissionsverhalten, lassen sich die zwölf verbliebenen Sortenbezeichnungen vier Sortenklassen –

1. Mischschrott (inklusive SVM),
2. Karossen (inklusive Karossenpakete),
3. Blechabfälle (inklusive Weiße Ware),
4. Komplexschrotte –

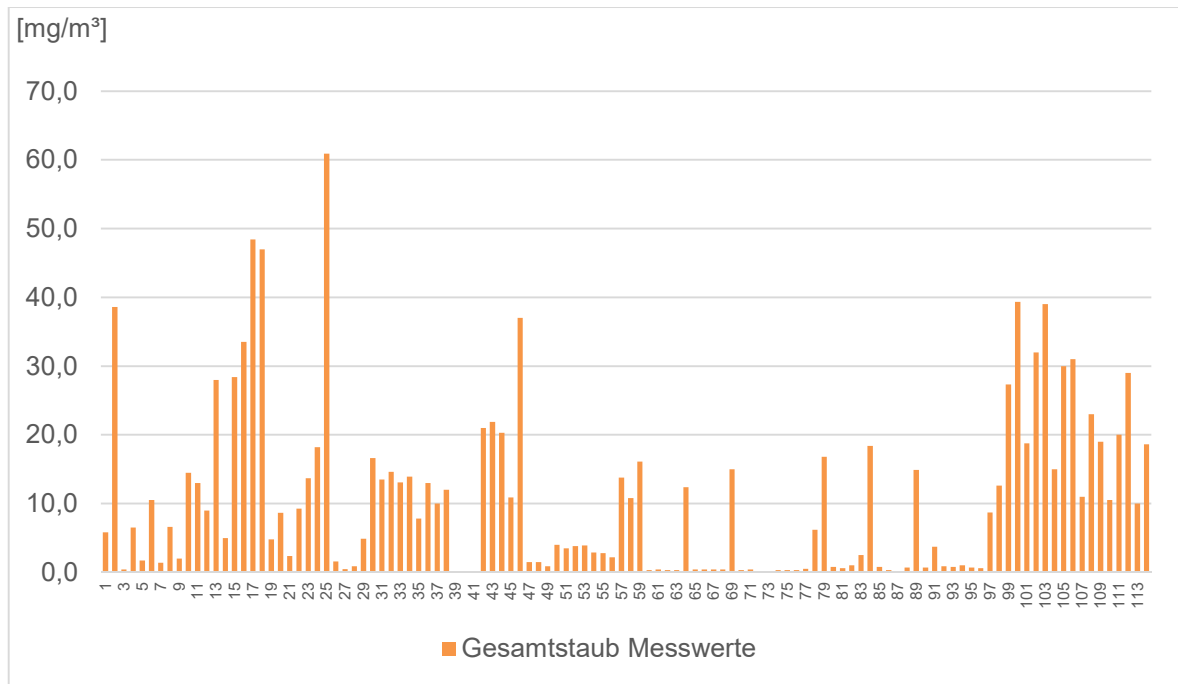
unterordnen, die in der Auswertung der Gesamtstaub- und TVOC-Werte Anwendung finden.

Dadurch verjüngt sich die sortenspezifische Untersuchung der Emissionswerte an Schredderanlage der TSR im Zeitraum 1974 bis 2017 auf 119 diskontinuierliche Gesamtstaub- und 110 kontinuierliche TVOC-Messungen. Der Datenevaluation werden die Sortenklassen 1 und 2 als Mischschrott und Karossen zu Grunde gelegt (siehe Anhang C für die Detailaufschlüsselung der Sortenbereinigung).

### **7.3.1 Gesamtstaubmessungen an Schredderanlagen der TSR**

Die Erfassung von Staubemissionen bzw. die gravimetrische Bestimmung der Staubbelaugung in der Abluft erfolgt an Schredderanlage i.d.R. nach der DIN/EN-13284-1 für Emissionen aus stationären Quellen oder der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 für Staubmessungen in strömenden Gasen (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7). Die Probenahmedauer der Einzelmessung beträgt standardgemäß 30 Minuten (Halbstundenmittel) und erfolgt isokinetisch für einen Teilstrom des Abgaskanals.

Abbildung 21 zeigt die Verteilung der gemessenen Maximalbelastungen aus dem Gesamtstaub in der gereinigten Abluft der 14 Schredder oder ihrer nachgeschalteten Separiereinheiten im Zeitraum 1974 bis 2017. Die aufgezeigten Werte (Halbstundenmittel) geben demnach die Konzentration der im Reingas emittierten Störstoffe und nicht die im Roh- bzw. Prozessgas befindlichen Ursprungsmengen in  $\text{mg}/\text{m}^3$  wieder.



**Abbildung 21: Auszug der maximalen Gesamtstaubbelastung an Schreddern von 1974 bis 2017**

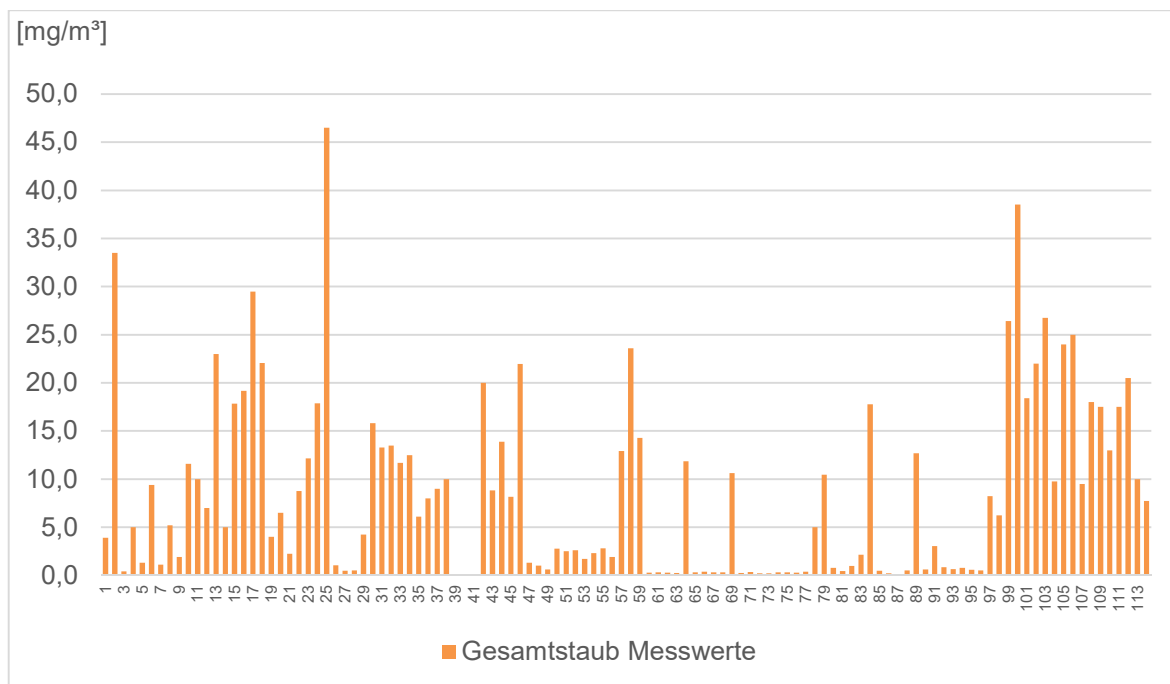
Fünf der 119 Staubmessungen wurden auf Grund von unzureichenden Messparametern aus der Gesamtauswertung ausgeschlossen.

Unter Einbindung der in Kapitel 6.2.7 und 6.3.2 geforderten Emissionsgrenzen für die Gesamtstaubbelastung im Abgas des Schredders von  $10 \text{ mg/Nm}^3$ , liegen 48 und damit 42,11 % der 114 gemessenen Maximalwerte außerhalb der neuen Vorgabe.

Der Nachweis über die Einhaltung der in den individuellen Nebenbestimmungen dekretierten Grenzwerte, liegt gegenüber der Behörde weniger in der Ermittlung der Emissionsspitzen, als vielmehr im Nachweis der erzeugten Durchschnittswerte unter normalen Betriebsbedingungen (Kapitel 6.3.3).

Abbildung 22 stellt die ermittelten Durchschnittswerte (Halbstundenmittel) der selektierten 114 Messungen im betrachteten Zeitraum dar. Bei der Durchschnittbelastung überschreiten nur 33,33 % der gemessenen Werte die aktuelle Grenzwertbestimmung von  $10 \text{ mg/Nm}^3$ . Grundsätzlich muss bei der hier durchgeführten Aufstellung der Grenzwertüberschreitung bedacht werden, dass diese unter Berücksichtigung der individuellen Genehmigungslage, generell keinen Verstoß der rechtlichen Emissionsgrenzen bedeutet. Historisch bedingt, bewegt sich die zulässige Gesamtstaubgrenzwertbelastung der untersuchten Schredderanlagen zwischen  $10$  und  $100 \text{ mg/Nm}^3$ . Unter Rücksichtnahme der einzelnen Nebenbestimmungen, erfüllen alle Messungen den rechtlichen Rahmen.

Der Mittelwert aus der Gesamtstaubbelastung beträgt  $8,4 \text{ mg/m}^3$ . Eine Korrelation aus der installierten Abgasreinigungstechnik (Trocken- oder Nassentstaubung) zu den gemessenen Emissionswerten, lässt sich gemäß der Ausführungen im BREF (Abbildung 16) hier ebenfalls nicht ableiten.



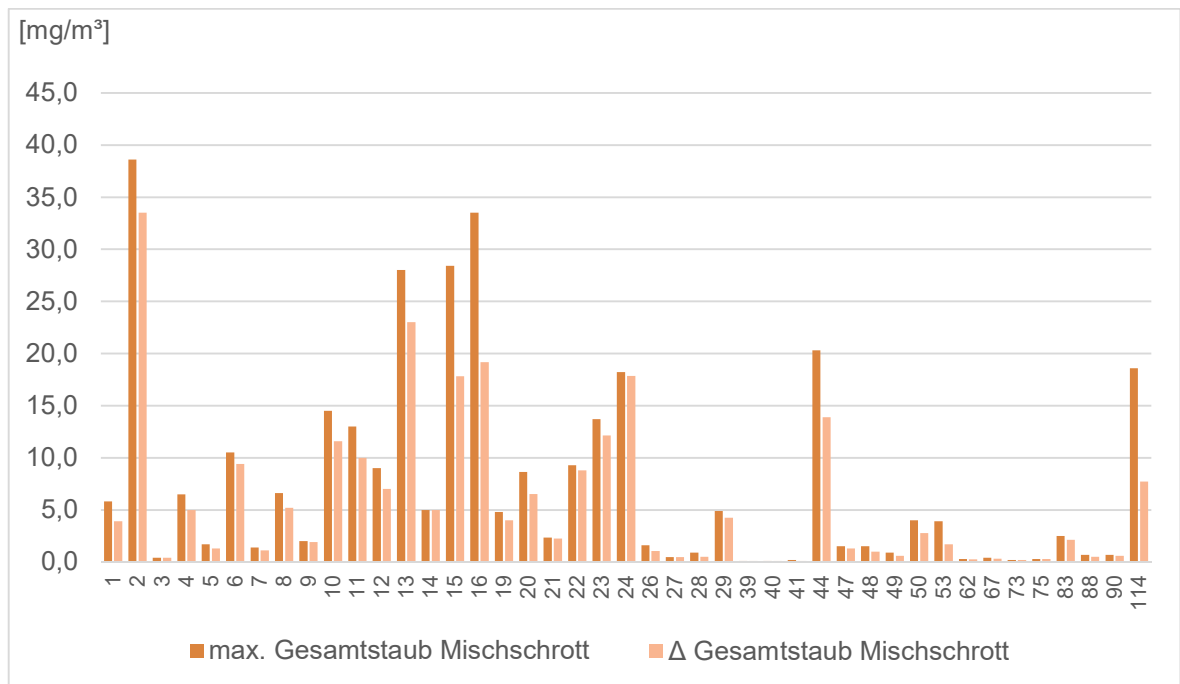
**Abbildung 22: Auszug der durchschnittlichen Gesamtstaubbelastung an Schreddern von 1974 bis 2017**

Die Aufteilung der Messdaten in die festgelegten Sortenklassen 1 und 2 (Mischschrott und Karossen) liefert einschlägige Erkenntnisse zu den Emissionsbeschleunigern. Wo die gesammelten Daten aus der Abbildung 21 und Abbildung 22 lediglich ein Gesamtbild der gemessenen Emissionsbandbreite abgeben, zeigen die Abbildung 23 und Abbildung 24 stoffstromspezifische Tendenzen im Emissionsverhalten an Schredderanlagen auf.

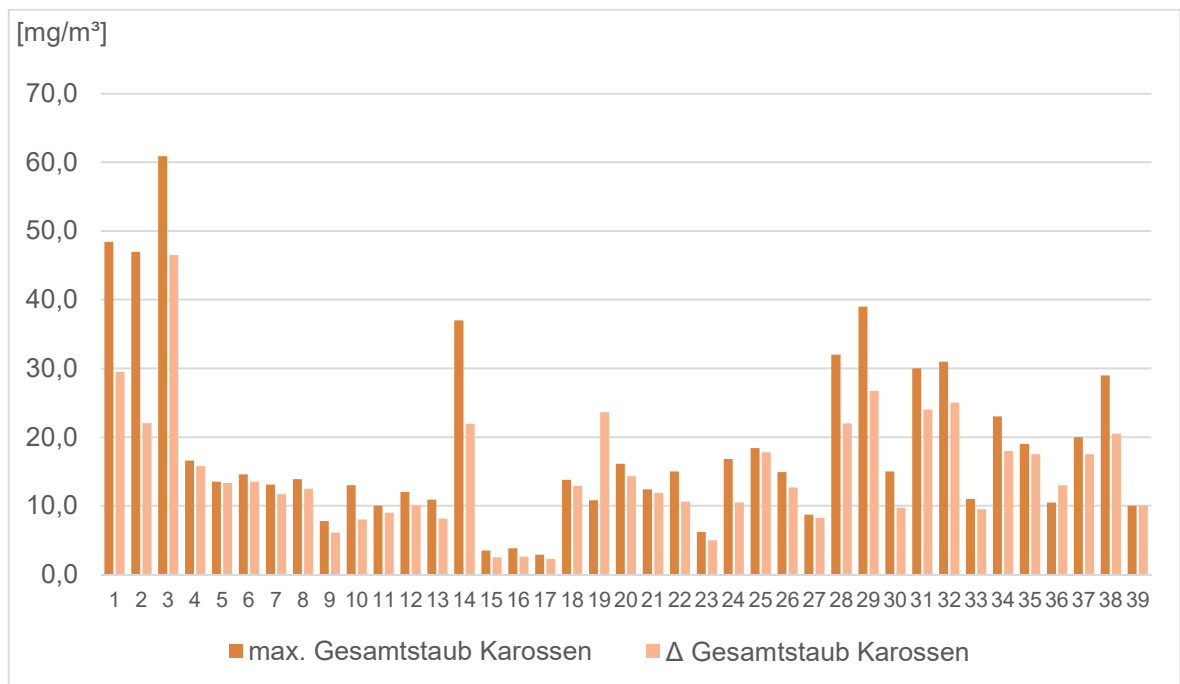
43 der 114 Gesamtstaubmessungen sind bei der Verarbeitung von Mischschrott und SVM-ähnlichen Stoffen erfolgt. Weitere 39 Messungen stellen das Ergebnis aus der Aufbereitung von Karossen, Karossenpaketen und mit Mischschrott konditionierten Karossen dar. Die restlichen 28 % der Messungen werden auf Grund ihrer geringen Risikoeinstufung im Emissionsverhalten (bspw. Blechabfälle) und Einzelstellung (bspw. DSD-Material oder MV-Schrott) von der Analyse ausgeschlossen.

Entgegen der Erkenntnis, dass Misch- und Sammelschrotte an Schredderanlagen einen höheren Feinkornanteil besitzen – diese Feststellung rührt aus der mengentechnischen Bewertung von Verlanderesten im Rahmen der Befundung und den erhöhten SLF-Feinanteilen

nachgewiesen im Produktionscontrolling – führen die Messergebnisse in Abbildung 24 eine erhöhte Staublast bei der Verarbeitung von Klasse 2 Schrotten auf (siehe Kapitel 9.2.3.3).



**Abbildung 23: Auswertung der Gesamtstaubbelastung durch Mischschrott in Schreddern von 1974 bis 2017**



**Abbildung 24: Auswertung der Gesamtstaubbelastung durch Karossen in Schreddern von 1974 bis 2017**



Der Datenverlauf in Abbildung 24 hebt hervor, dass in Folge der Verarbeitung von Karossen 79,49 % der gemessenen Emissionsspitzen und 66,67 % der gemittelten Emissionswerte über den aktuell geforderten Emissionsgrenzen von  $10 \text{ mg/Nm}^3$  für Altanlagen liegen. Unter Anwendung verschärfter Grenzen im Rahmen der Neugenehmigung, werden 92,31 % der gemessenen Spitzen- und Durchschnittswerte außerhalb von  $5 \text{ mg/Nm}^3$  erfasst. Entgegen der Verteilung in Abbildung 24, befinden sich nur 18,60 % der gemittelten Gesamtstaubemissionen bei der Verarbeitung von Mischschrottfractionen oberhalb der Zehnmilligrammgrenze (siehe Abbildung 23).

Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessene Gesamtstaubbelastung bei der Aufbereitung von Klasse 2 Sorten, trotz der niedrigeren Feinkornfraktionierung fast vier Mal höher ist, als bei den Mischschrotten. In Karossen und Paketen eingemischte bzw. eingebrachte Feinanteile (Feinstpartikel) oder Lackrückstände sowie systemgebundene Kunststoffe, die anders als beim normalen Schreddervormaterial, nicht beim Abkippen und/oder dem Umschlag befreit, sondern erst durch den Aufschluss in der Anlage freigesetzt werden, können eine wesentliche Ursache für diese Entwicklung sein.

### **7.3.2 Staubinhaltsstoffe an Schredderanlagen der TSR**

Die Charakterisierung der chemischen oder mineralogischen Zusammensetzung filtergebundene Staubinhaltsstoffe (speziell Schwermetalle) wird über die VDI-Richtlinien 3868 (Probenahme) und 2268 (Analytik) geführt. Weitere Richtlinien und Normen zur Bestimmung von Staubinhaltsstoffen, können den zuvor genannten Tabellen der Kapitel 6.2.7 und 6.3.2 entnommen werden.

Die VDI-Richtlinie 3790 Blatt 1 zu Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen, definiert den Gesamtstaub als Ansammlung dispers verteilter Partikel festen Aggregatzustands in der Luft oder anderen Gasen (Zweiphasensystem) mit einer Sinkgeschwindigkeit kleiner gleich  $10 \text{ cm/s}$ .

Staubniederschlags- bzw. Staubdepositionsmessungen gehören in den Immissionsteil von Umweltbelastungsanalysen. Das Normgerüst um Immissionsmessungen ist entsprechend dem Objektbezug anzusetzen. An Schreddern interessieren besonders die durch alveolengängige und einatembare Staubfraktionen (A- und E-Stäube) hervorgerufenen Immissionsbelastungen (VDI-Richtlinie 2463 Blatt 1, 7 und 8 und VDI-Richtlinie 4320 Blatt 2) und Schwermetalldepositionen.

Tabelle 14 listet die in der Abluft und im Staubniederschlag nachgewiesenen wesentlichen Inhaltsstoffe der 14 Referenzanlagen auf. In der Tabelle werden nur solche (Schwer-)Metalle und Stoffe aufgezeigt, die im Mittel oberhalb ihrer Nachweisgrenze lagen.

Elemente und Stoffe, die als Spuren und gemäß den formalen Grenzwertbestimmungen in unkritischen Konzentrationen vorhanden waren (Ti, Se, Tellur (Te), Palladium (Pd), Asbest etc.), werden von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

**Tabelle 14: Massenrelevante Staubinhaltsstoffe an Schreddern von 1974 bis 2017**

Nachweisform	Inhaltsstoffe	Einheit
Staubförmige Stoffe in der Abluft	Fe	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
	Cd, Hg,	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
	As, Pb, Co, Ni,	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
	Sb, Cr, Cu, Mn, V, Zinn (Sn), Zn	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Staubförmige Stoffe und Massenbilanzen der Deposition	Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Ti, V (Massenbilanz)	[mg/(m <sup>2</sup> *d)]
	Staubniederschlag (Gesamtsumme)	[mg/(m <sup>2</sup> *d)]
	Schwebstaub (Konzentration)	[µg/m <sup>3</sup> ]
	A-Staub (Konzentration)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
	E-Staub (Konzentration)	[mg/Nm <sup>3</sup> ]

Neben den diversen Analysen von Staubinhaltsstoffen, wurden im Laufe der besagten Messperiode auch summenbilanzierte Untersuchungen und Hochrechnungen für die Staubemissionen und Kornbandverteilungen aus diffusen Quellen durchgeführt (siehe auch VDI-Richtlinie 3790 Blatt 3).

Unter Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung, werden für den Umschlag des Vormaterials und die Sorte 4-Verladung im Mittel fünf Mal höhere Staubemissionen prognostiziert, als für die bereinigte Schredderabluft. Beim Umschlag der SLF werden etwas weniger als die Hälfte der Staubemissionen des Vormaterialumschlags erzeugt.

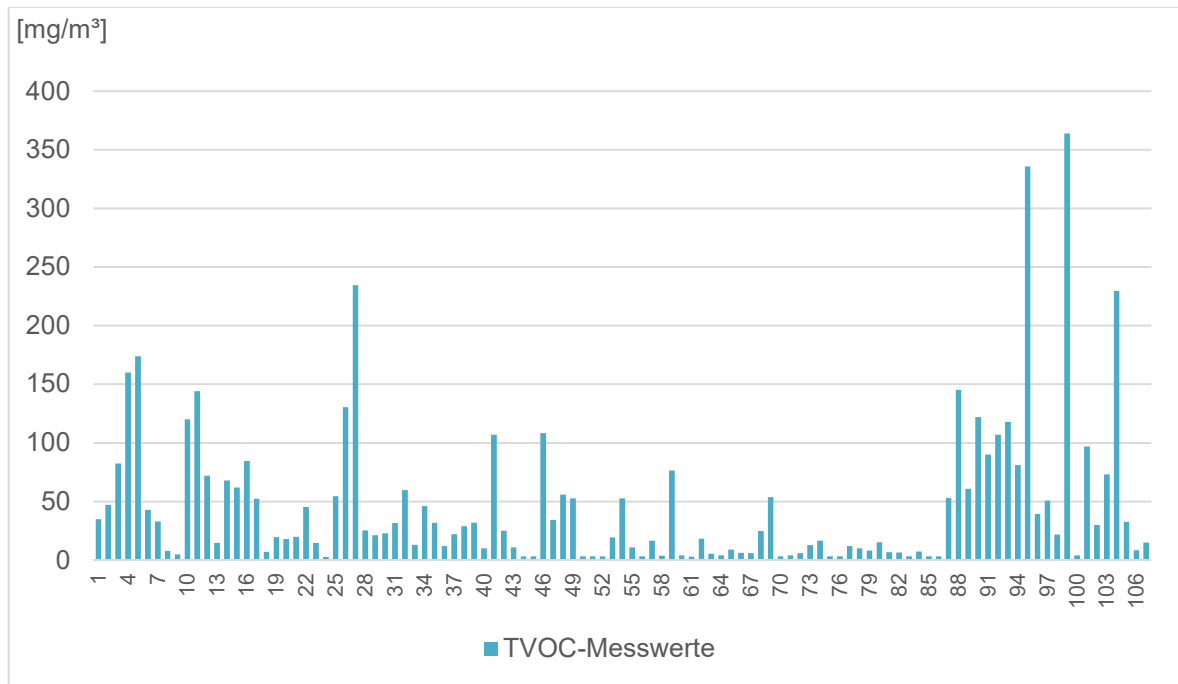
Rechnerisch liegen 80 % der Staubpartikeldurchmesser im Materialumschlag über 10 µm. Die Partikelgrößenverteilung am Abgasschlot des Schredders, wird wesentlich durch das Filterspektrum bzw. die Effektivität der Ablufteinigungstechnik beeinflusst. So, dass 100 % der prognostizierten Partikeldurchmesser in der Reinluft kleiner dem Filterquerschnitt sind. Die gelieferten Werte erheben keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und sind als individuelle Kenngrößen einzuordnen. Inwiefern diese Hochrechnung für andere Schredderanlagen gilt, ist im Einzelfall zu prüfen.

### 7.3.3 TVOC-Messungen an Schredderanlagen der TSR

Die Messung des TVOC in der Prozess- und/oder Reinluft des Schredders, wird über die bereits in Tabelle 7 dieser Arbeit aufgeführte VDI-Richtlinie 3481 Blatt 1 zur Messung gasförmiger Emissionen geregelt. Das Blatt 1 der Richtlinie ist auf das Jahr 1975 datiert und deckt folglich alle in dem untersuchten Zeitraum durchgeführten 110 TVOC-Messungen mit ab. Das Messen der Kohlenwasserstoffkonzentration erfolgt an der relevanten Austrittsstelle des Schredders i.d.R. mit dem sogenannten „Flammenionisationsdetektor“ (FID) [28]. Als kontinuierliches Messverfahren verfolgt die FID-Anwendung den zeitlichen Ablauf einer Emission (bspw. im Chargenbetrieb) und ermöglicht trotz des hohen apparativen sowie kalibriertechnischen Aufwands und der damit verbundenen geräte- und strukturabhängigen Anzeigeempfindlichkeiten, Messungen in großen Konzentrationsbereichen mit sofort verfügbaren Messergebnissen (VDI- Richtlinie 3481 Blatt 3 und 6).

Auf Grund der extrem hohen Konzentrationsbereiche an Schredderanlagen, sind parallelgeschaltete FID-Geräte zu empfehlen. Die messtechnische Kalibrierung der FIDs ist für einen deutlich kleineren Konzentrationsbereich gültig. Bei Halbstundenmittelwerten nivellieren sich die gemessenen Werte i.d.R. aus. Kurzzeitig können jedoch sehr hohe Werte erreicht werden, die den oberen Messbereichsendwert (bspw. 1.000 ppm) der gültigen Kalibrierung übertreffen.

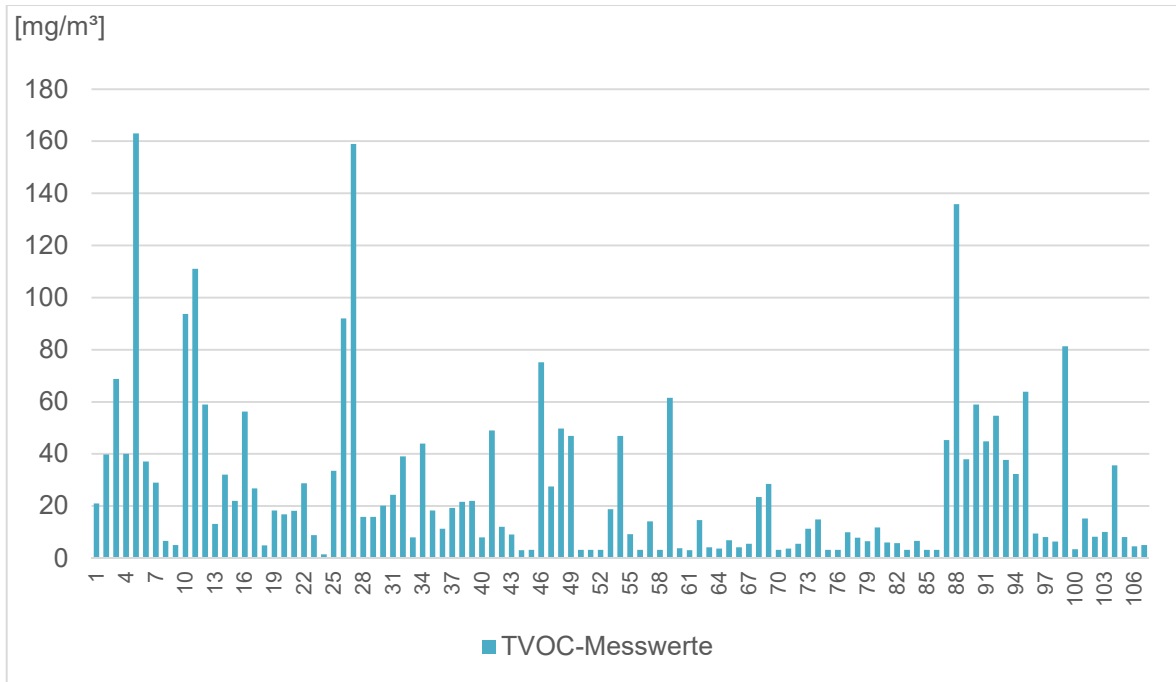
Ergänzend zu den messtechnischen Grundlagen in Kapitel 7.2 sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Erfassung des gesamten gasförmigen organisch gebundenen Kohlenstoffs im Konventionsverfahren, eine klare Festlegung von Grenzwert und Messmethode in den Nebenbestimmungen der Betriebseinheit fordert. Die Auswertung einzelner Kohlenstoffverbindungen im Abgas gestaltet sich darüber hinaus als sehr aufwendig und ist i.d.R. nicht Teil des Genehmigungsbescheides. Die im folgenden Abschnitt dargestellten Messprojekte zur Erhebung der VOC sind daher im Wesentlichen als Summenmessung im Halbstundenmittel ausgelegt (Abbildung 25 bis Abbildung 28). Entsprechend der Gesamtstaubanalyse in Kapitel 7.3, sind auch diese Messungen zeitlich randomisiert.



**Abbildung 25: Auszug der maximalen TVOC-Belastung an Schreddern von 1974 bis 2017**

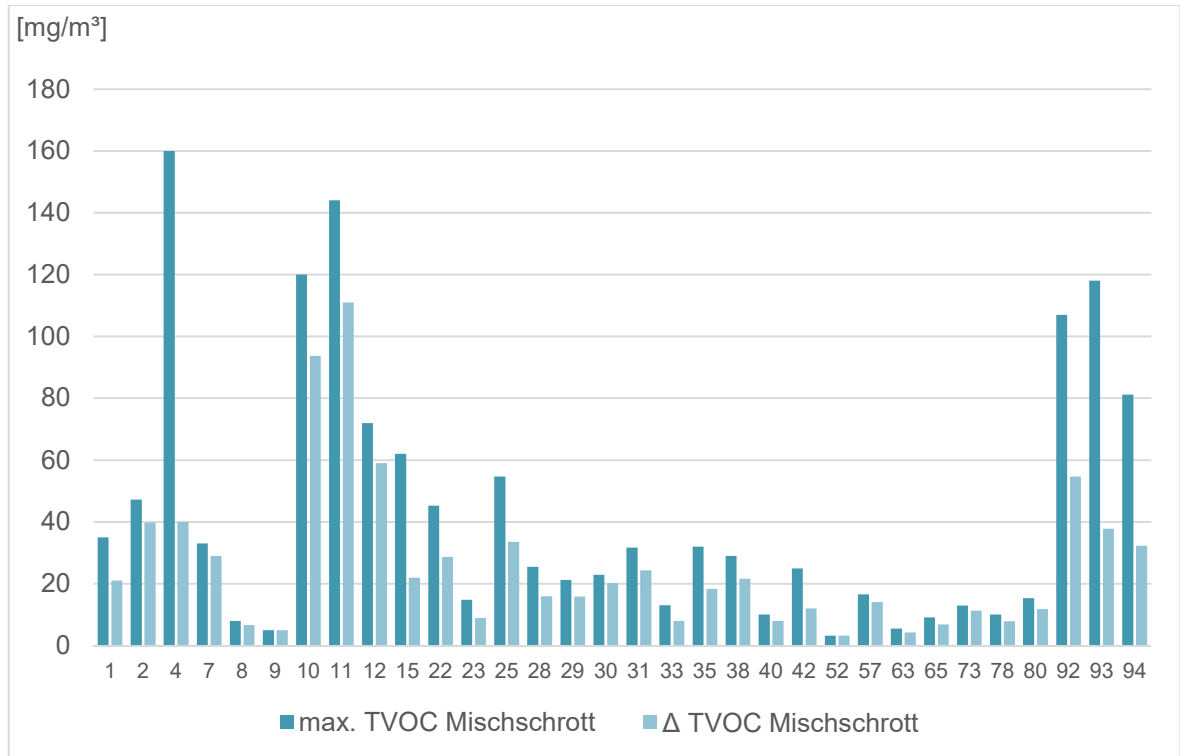
Die in Abbildung 25 erschlossenen Spitzenwerte der TVOC-Belastung sind der Übersichtlichkeit des Diagrammbereiches (Maßstab) halber von 110 auf 107 Messungen bereinigt. Die drei ausgeschlossenen Spitzenwerte liegen zwischen 1.019 und 1.608 mg/m<sup>3</sup> TVOC und sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Brandverschleppungen oder Anlagendefekte während der Halbstundenmessung zurückzuführen. Unter Einbindung der in Kapitel 6.3.2 festgelegten Emissionsgrenze des TA Luft-Entwurfes von 50 mg/Nm<sup>3</sup> für den in der Abluft gemessenen TVOC-Gehalt, liegen 35 Messungen und damit 32,71 % der Werte in Abbildung 25 oberhalb des geforderten Grenzwertes.

Die erhobenen Momentaufnahmen lassen sich durch die in Abbildung 26 aufgezeigten Durchschnittswerte ergänzen. Hier überschreiten nur 14,02 % des gemittelten TVOC-Gehalts den geforderten Grenzwert. Entsprechend der Datenevaluation für den Gesamtstaub müssen auch bei der hier durchgeführten Aufstellung der Grenzwertüberschreitung, die individuellen Nebenbestimmungen mit berücksichtigt werden. Die definierten Emissionsgrenzen für den TVOC bewegen sich für die betrachteten Schredderanlagen ebenfalls zwischen 10 und 100 mg/Nm<sup>3</sup>.

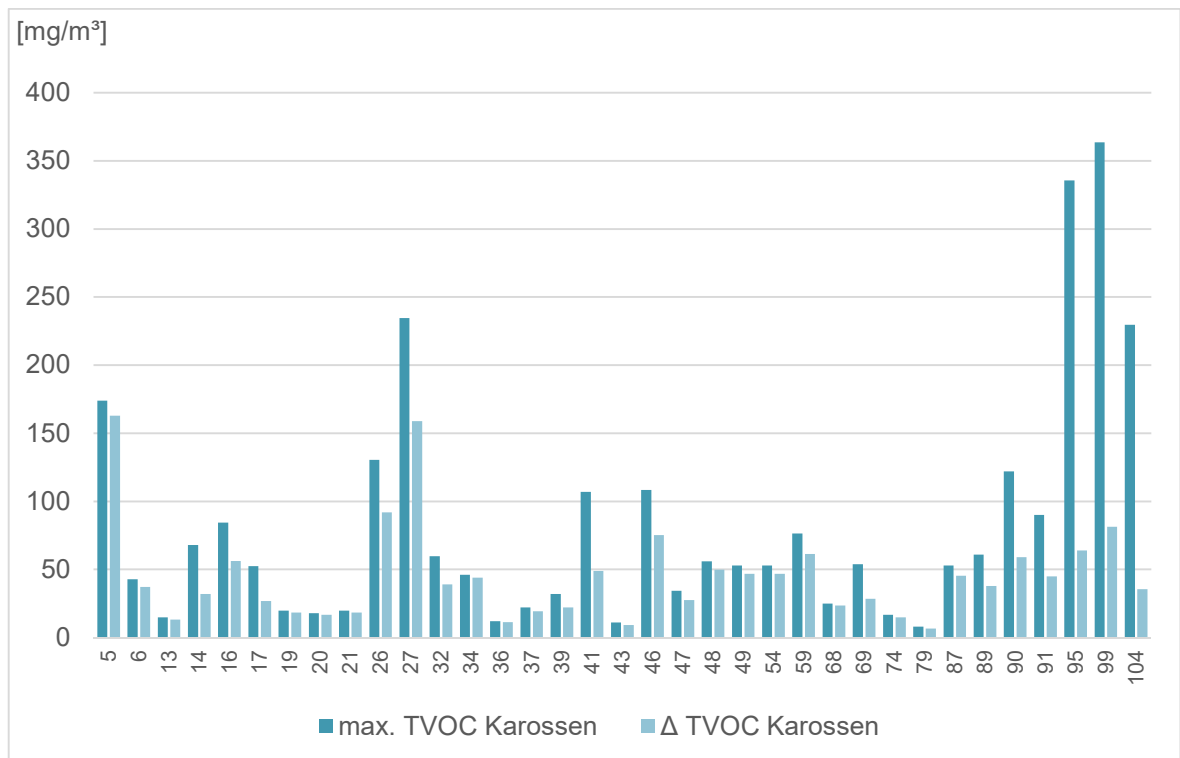


**Abbildung 26: Auszug der durchschnittlichen TVOC-Belastung an Schreddern von 1974 bis 2017**

Die stoffstromorientierte Aufschlüsselung der TVOC-Daten folgt der in Kapitel 7.3.1 festgelegten Sortenklassierung. 33 der 107 Messungen sind im Rahmen der Mischschrottaufbereitung durchgeführt worden. Bei der Karossenverarbeitung wurden 35 TVOC-Messungen abgeschlossen. Damit fallen ca. 36 % der erhobenen Messungen in die definierten Klassen 3 und 4 für Blechabfälle und die Umarbeitung der Komplexschrotte. Die sortenbereinigten Ergebnisse finden sich in den nachfolgenden Abbildung 27 und Abbildung 28.



**Abbildung 27: Auswertung der TVOC-Belastung durch Mischschrott in Schreddern von 1974 bis 2017**



**Abbildung 28: Auswertung der TVOC-Belastung durch Karossen in Schreddern von 1974 bis 2017**

Im Zuge der Verarbeitung von Mischschrott liegen 30,30 % der Maximal- und 15,15 % der Durchschnittswerte des TVOC-Gehalts in der gereinigten Abluft über der geforderten Emissionsgrenze von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Die bei der Aufbereitung von Karossen gemessenen Emissionsspitzen bewegen sich zu 60 % über der gesetzten Schwelle und sind damit doppelt so hoch, wie in der Mischschrottaufbereitung. Im gemessenen Mittel sind 9 der 35 Messungen (25,71 %) in der Karosserieschrottaufbereitung außerhalb der Norm.

### **7.3.4 TVOC-Sondermessungen an Schredderanlagen der TSR**

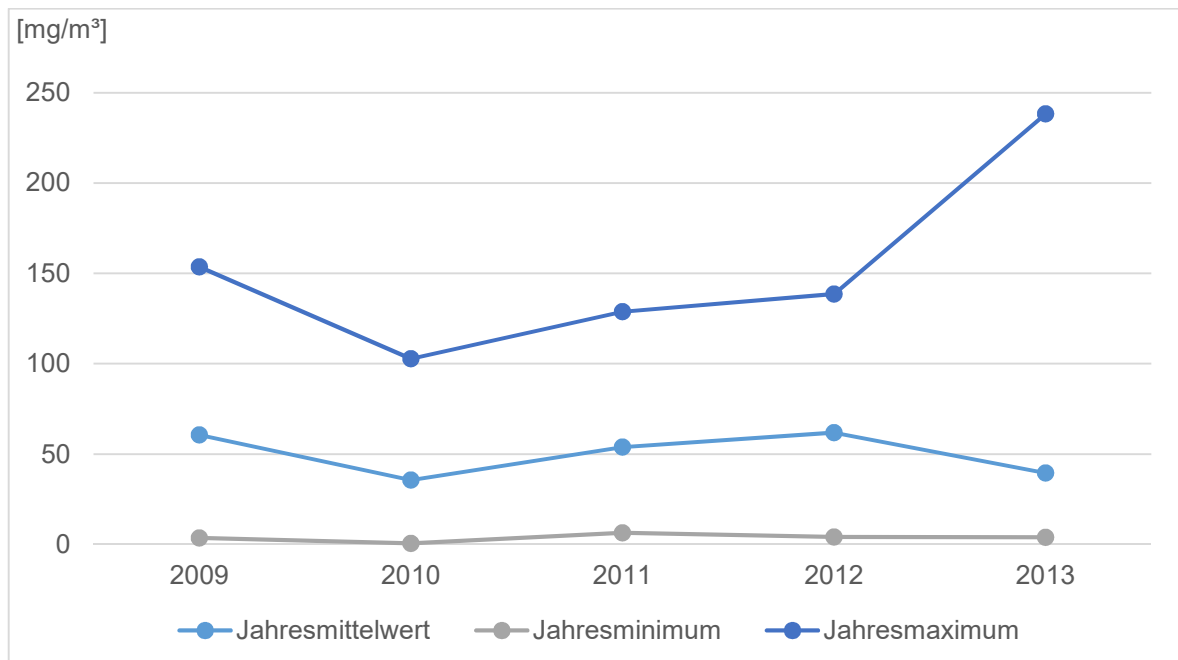
Die Aufbereitung von Klasse 2 Sorten (Karossenmischfraktion) macht bei der TSR durchschnittlich zwischen 5 und 30 % der Verarbeitungsmengen im Schredder aus (Verweis Kapitel 4.1), sodass die erhöhten Werte im Tagesmittel einen verhältnismäßig geringen Anteil der Gesamtemissionsbelastung abdecken. Die segregiert stoffstromorientierte Erfassung der Emissionswerte über einen definierten Zeitraum, kann in diesem Kontext helfen, die Emissionswirkung des Vormaterials noch besser einzuschätzen und eine nachhaltige Risikobewertung in Gesamtkontext der Anlagenneuplanung vorzunehmen. Für Schredderbetreiber ist es zukünftig noch wichtiger zu verstehen, welches Emissionspotential im Inputsortenmix steckt und wie die Anlage im Rahmen der gesetzlichen Einschränkungen auszuliegen und zu fahren ist.

Die erhobenen Daten sind das Ergebnis einer sechsjährigen Studie über das stoffstrombasierte Emissionsverhalten an einer seit 2014 außer Betrieb genommenen Schredderanlage der TSR Gruppe. Der Anlass der Untersuchung steckt in der Überprüfung der Einhaltung der Emissionsbegrenzung und der Ursachenanalyse eines bestimmten Emissionsverhaltens.

Der TVOC-Gehalt ist im Rahmen dieser Studie über ein FID-Messgerät inklusive Emissionsauswerterechner gemäß DIN EN 14181 und VDI-Richtlinie 3950 (Emissionen aus stationären Quellen) am Abgaskamin der Nasswäschereinrichtung erfasst worden. Die Auswertung der Daten erfolgt hier auf der Basis gemessener Minutenwerte und den daraus kumulierten Halbstundenmittelwerten sowie dem Tagesmittel in Verbindung mit den hinterlegten Produktionstagesberichten. So lassen sich der zeitliche Ablauf der TVOC-Emissionen in Abhängigkeit mit dem verarbeiteten Materialinput darstellen und entsprechende Informationen über das Schadstoffpotential des Vormaterials und den Wirkungsgrad der Abluftnachbehandlungseinrichtung generieren.

Die Bewertung der Halbstundenmittelwerte richten sich nach den Nebenbestimmungen der Anlage. Während 60 % der Jahresbetriebszeit ein Emissionsgrenzwert von  $55 \text{ mg/Nm}^3$  im gereinigten Abgas einzuhalten ist, sind für den Rest der Betriebszeit  $10 \text{ mg/Nm}^3$  als Grenze festgeschrieben. Aus diesem Grund ist eine prozentuale Häufigkeitsverteilung der TVOC-Werte in die Auswertung mit eingebunden. Für die Analyse der Tagesmittelwerte, werden in Bezugnahme auf die neue Grenzwertvorschrift,  $50 \text{ mg/Nm}^3$  als TVOC-Schwelle festgelegt. Zusätzlich darf kein Halbstundenmittelwert das doppelte des Tagesmittelwertes, d.h.  $100 \text{ mg/m}^3$  überschreiten. Das Sortenspektrum der Studie ist auf vier Inputströme beschränkt. Eine Erfassung der Roh- zu Reingaswerte sowie ihrer Inhaltsstoffe erfolgte auch in diesem Messprojekt nicht. Der effektive Wirkungs- bzw. Abscheidegrad der Abgasreinigungseinrichtung ist damit nur qualitativ – Grenzwert eingehalten oder nicht eingehalten – bewertbar.

In der Abbildung 29 werden die durchschnittlichen Tagesmittelwerte für die Betriebsjahre 2009 bis 2013 an der untersuchten Schredderanlage aufgezeigt. Unter Einbindung der spezifischen Häufigkeitsverteilung liegen nur 51,77 % des gemessenen TVOC unter  $50 \text{ mg/m}^3$ . Diese vereinfachte Auswertung der Daten zeigt bereits, dass die Nasswäscheranwendung verfahrenstechnisch nicht geeignet ist, den TVOC-Gehalt gemäß Vorgabe einzuhalten.



**Abbildung 29: Auswertung der durchschnittlichen TVOC-Tagesmittelwerte von 2009 bis 2013**



Die Analyse der Halbstundenmittelwerte für den Zeitraum September 2008 bis September 2010 lässt eine detailliertere Betrachtung des Emissionsverhaltens an der Referenzanlage zu. Das aufbereitete Datengerüst der Tabelle 15 verdeutlicht das in Abbildung 29 geprägte Bild der Grenzwertüberschreitung. Setzt man die in Tabelle 15 aufgeführte Mengenverteilung in den Jahren 2008 bis 2010 in ein Verhältnis, dann liegen in Summe nur 63,27 bis 86,78 % des gemessenen TVOC-Gehalts unterhalb der festgelegten 55 mg/Nm<sup>3</sup>. Der Forderung, dass 40 % der gemessenen Emissionen maximal 10 mg/Nm<sup>3</sup> betragen sollen, wird das System nur in 2008 gerecht. Wobei anzumerken ist, dass die Fülle der Messungen auf Grund des Projektstarttermins gegen Jahresende, weniger aussagekräftig ist, als die vollumfänglichen messtechnischen Erfassungen in den Jahren 2009 und 2010.

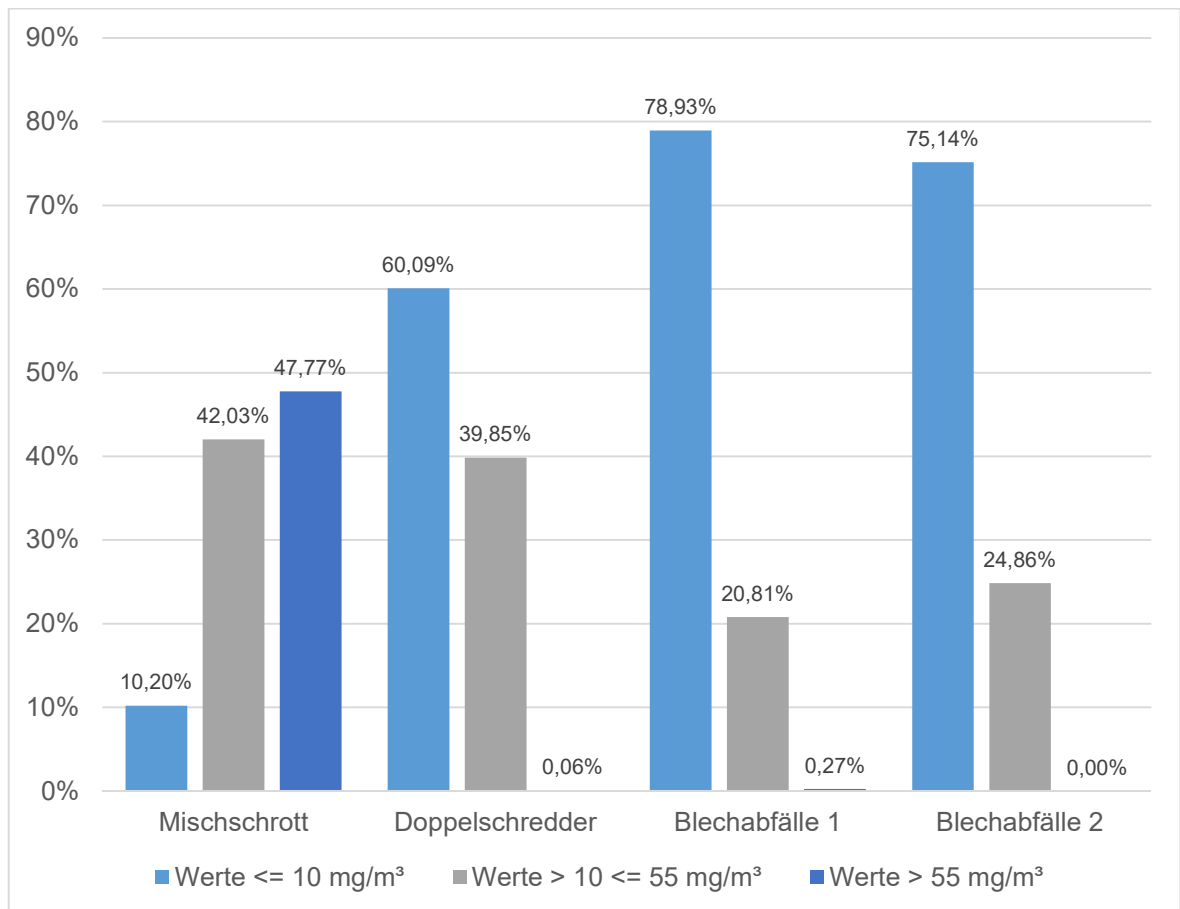
**Tabelle 15: Auswertung der FID-Datenerhebung von 2008 bis 2010**

[mg/m <sup>3</sup> ]	2008	2009	2010
Jahresmittelwert	24,48	58,35	40,72
Minimum	0,91	0,87	0,39
Maximum	229,62	363,75	335,68
Werte ≤ 10	500 (45,29%)	659 (23,41%)	1.133 (34,81%)
Werte > 10 ≤ 55	458 (41,49%)	1.122 (39,86%)	1.177 (36,16%)
Werte > 55	146 (13,22%)	1034 (36,73%)	945 (29,03%)
Summe Messwerte	1.104	2.815	3.255
Mittelwert < 10	5,22	6,35	6,51
Mittelwert > 10	40,42	74,24	58,98

Die sortengewichtete Beurteilung der Messdaten im betrachteten Zeitraum lässt erkennen, dass die Mengenverteilung der Emissionskonzentration im gereinigten Abgas durchaus von der Form des verarbeiteten Vormaterials abhängt (Abbildung 30). Dabei geht es nicht nur um das Ausmaß der potentiellen Emissionsbandbreite, wie in den Kapiteln 7.3.1 und 7.3.3 im Rahmen der Messhistorie aufgezeigt, sondern auch um die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Konzentrationen, die wiederum das nachweisgeführte Halbstundenmittel bilden.

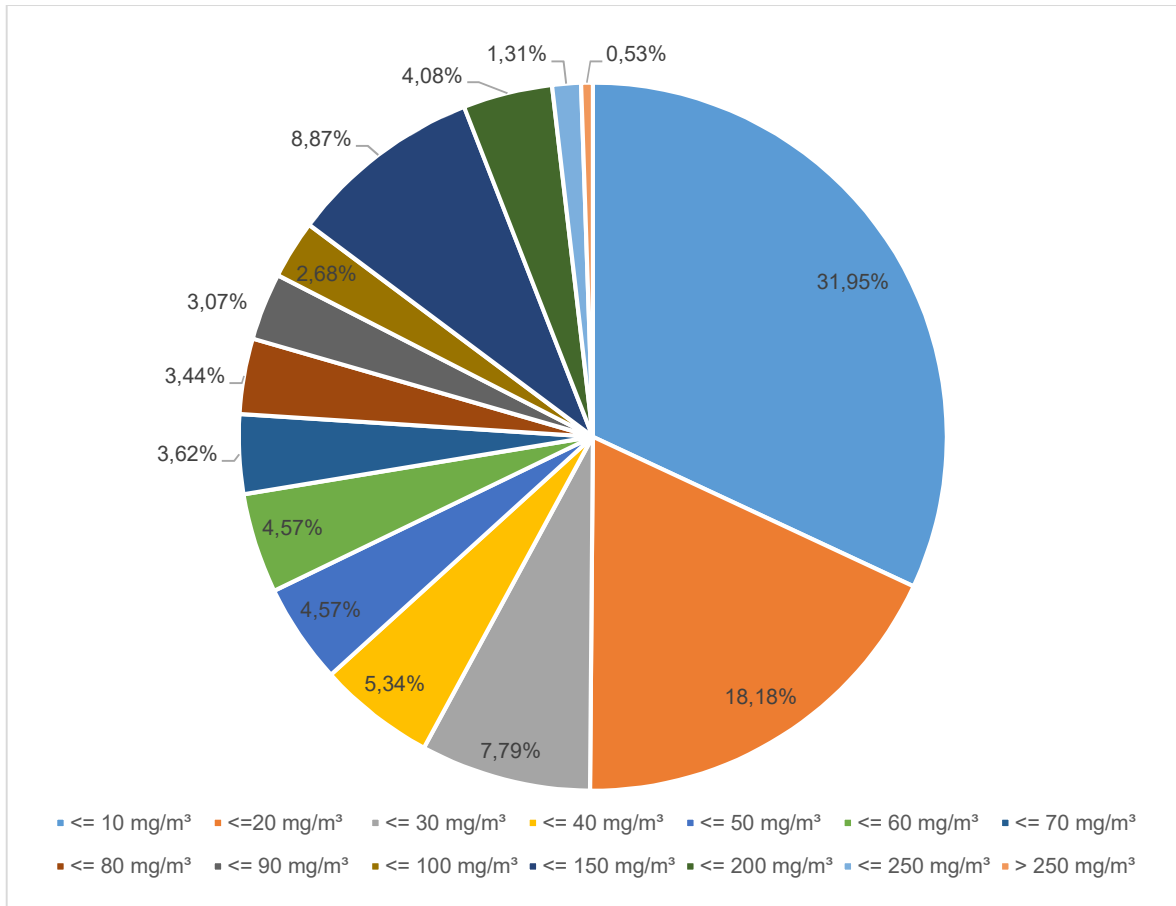
Die im Mischschrott nachgewiesenen Konzentrationen sind im Vergleich zu den anderen Sorten nicht nur um fast 50 % höher, sondern befinden sich zu ca. 90 % über der statuierten 10 mg/m<sup>3</sup>-Grenze. Die Häufigkeitsverteilung der anderen Sorten erfüllt die Forderungen der Nebenbestimmung. Die zuvor evaluierten Unterschiede im Emissionsverhalten der Sortenklassen finden sich in den gegenwärtigen Daten folglich wieder.

Mischschrott dominiert in der betrachteten Fallstudie den verarbeiteten Mengenstrom. 61,96 % des Inputmaterials wurde in Form von leichtem Mischschrott und Schmelz in den Jahren 2008 bis 2010 über den Schredder gefahren. Eine Anpassung der Mengenverteilung kann kalkulatorisch zu einer Einhaltung der unteren Emissionsgrenze führen – siehe hierzu die Werteverteilung der Tabelle 15 aus den Jahren 2009 und 2010 – scheidet gesamtheitlich aber an der Anzahl der oberen Grenzwertüberschreitungen. Die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Emissionsverhaltens u.a. durch die Konditionierung des Vormaterials werden in Kapitel 9.2.2 weiter diskutiert.



**Abbildung 30: Sortenspezifische Häufigkeitsverteilung von TVOC-Emissionen von 2008 bis 2010**

In Ergänzung dazu, zeigt Abbildung 31 beispielhaft die über den betrachteten Messzeitraum gemittelte Häufigkeitsverteilung der Emissionskonzentrationen ohne den Bezug zu einer gesonderten Inputsorte auf. In Summe sind 67,83 % der gemessenen TVOC-Konzentrationen kleiner gleich 50 mg/m³. Für eine Ursachenermittlung der spezifischen Emissionsbeschleuniger ist diese Auswertung jedoch weniger hilfreich.



**Abbildung 31: Gemittelte Häufigkeitsverteilung der TVOC-Konzentration von 2008 bis 2010**

Unter Zuhilfenahme der minutengenauen Messwerttaktung, lassen sich darüber hinaus weitere Erkenntnisse über den Materialstrom und sein Emissionsverhalten generieren. Abbildung 32 zeigt einen selektierten TVOC-Verlauf über zweieinhalb Stunden. Die Kopplung mit den Produktionsdaten verdeutlicht unterschiedliche Emissionsausprägungen zwischen den verarbeiteten Inputmaterialien.

Die Daten bestätigen u.a., dass die vorgenommene Zuordnung der Weißen Ware in die Sortenklasse 3 sinnvoll ist. Weiter bestehen schadstoffrelevante Unterschiede in den Mischschrottchargen. Die emissionstechnischen Auswirkungen von wärmedämmenden Materialien bewegen sich im Grenzwertbereich. Die im Zeitraum von 09:45 und 09:49 Uhr verarbeiteten Fässer und Verpackungen weisen auf kohlenstoffbasierte Reststoffe hin. Der in diesem Zeitabschnitt gemessene Emissionspeak kommt den Werten einer Verpuffung sehr nahe. Zu dem Emissionsverhalten in Folge einer Verpuffung gibt Abbildung 33 weiteren Aufschluss.

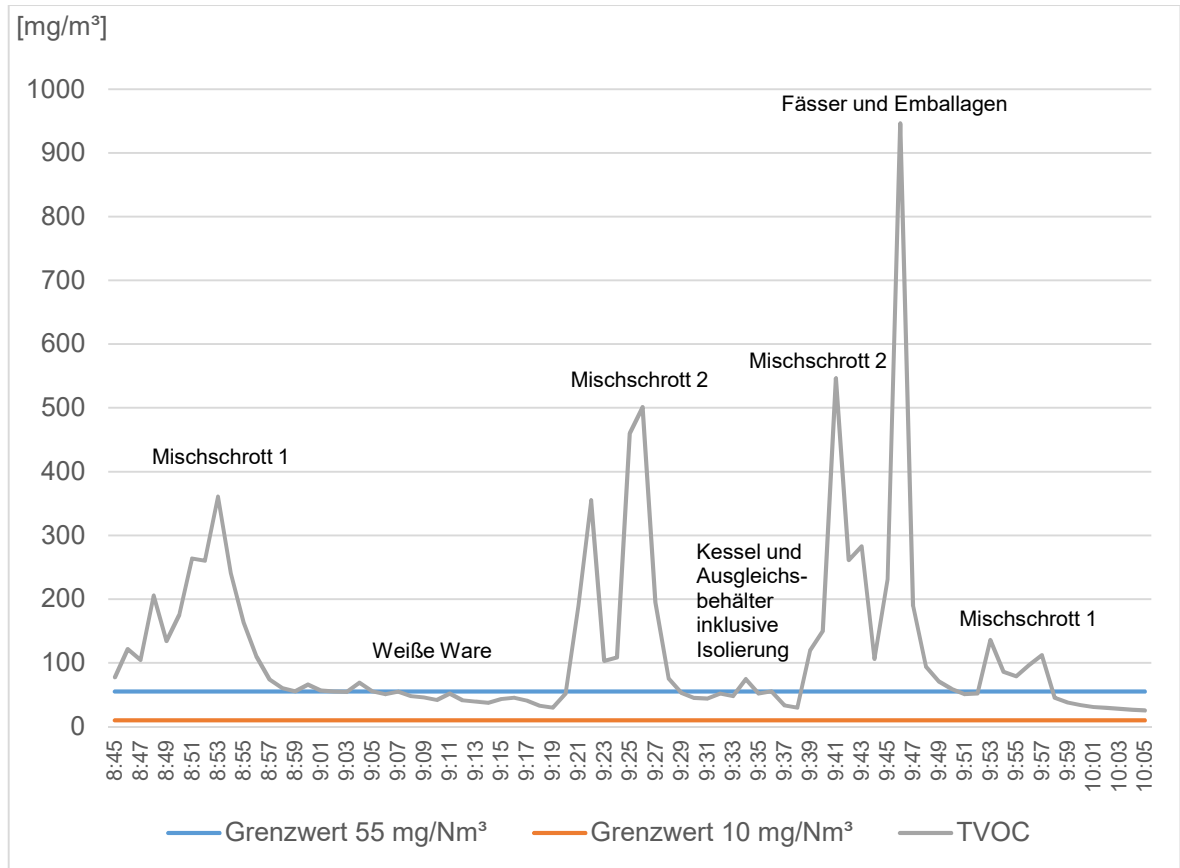


Abbildung 32: Stoffstrombasierte Einzelauswertung von TVOC-Minutenwerten

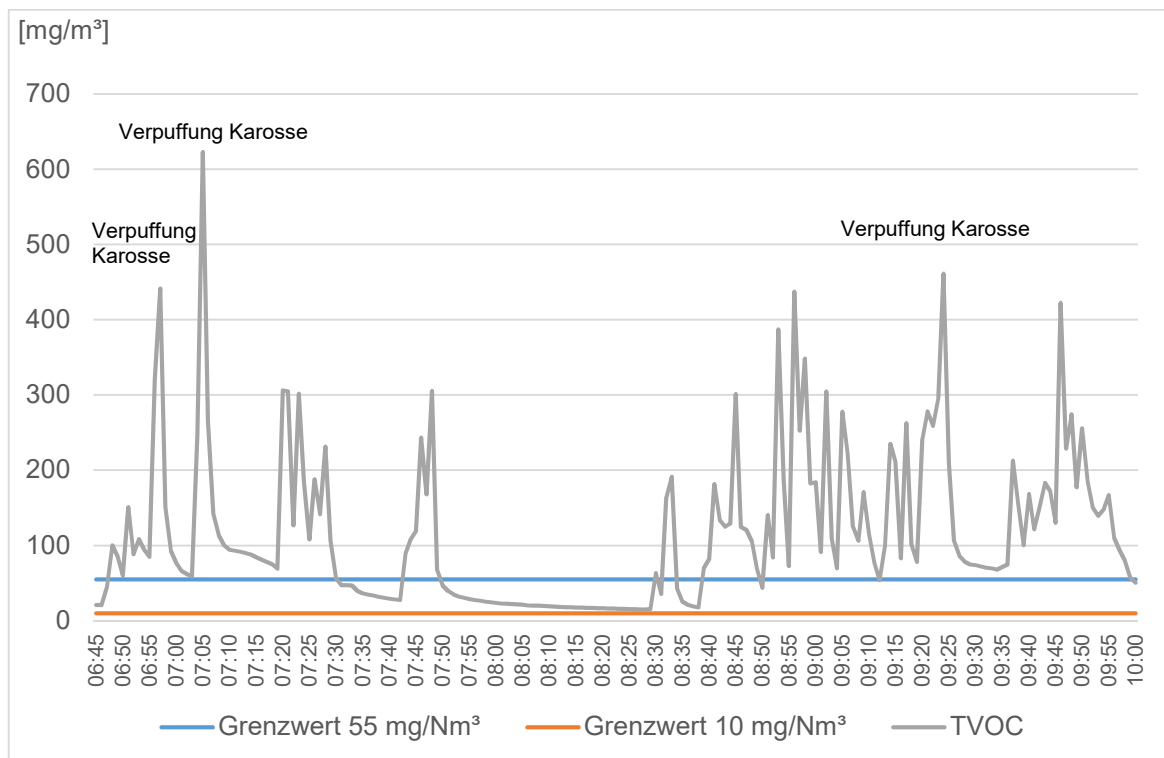


Abbildung 33: Einzelauswertung der TVOC-Gehalte in Folge von Verpuffungen

Die als Folge einer Verpuffung erreichten Emissionsspitzen bewegen sich im dargestellten Zeitraum von 06:45 bis 10:00 Uhr zwischen 441 und 622 mg/m<sup>3</sup> TVOC, können aber bei Bränden im Mühlenraum wesentlich höher ausfallen. An dieser Stelle sei rückwirkend auf die bereinigten TVOC-Spitzenwerte aus der Abbildung 25 verwiesen.

## 7.4 Emissionsmessungen an Schredderanlagen

Trotz des Umstandes, dass die gelieferten Daten aus individuellen Emissionsquellen entstammen und damit gewissermaßen im Einzelnen zu behandeln und zu deuten sind, können die daraus gewonnenen Erkenntnisse durchaus im Kontext der Weiterentwicklung von Schredderanlagen angewendet und damit verbundene Defizite in der Messdatenerhebung aufzeigen werden.

Die ausgewerteten Daten der Kapitel 7.3.1 und 7.3.3 sind im Vergleich zu der Datenerhebung in Kapitel 7.3.4 ein rudimentärer Ansatz Emissionen in Form der Gesamtstaub- und TVOC-Belastung an Schredderanlagen ganzheitlich darzustellen. Hierbei geht es weniger um die Deutung verfahrenstechnischer Vor- und Nachteile der installierten Abluftreinigungsanlagen, als vielmehr um die Lieferung aktueller Kennzahlen aus der Branche und den Versuch das Emissionsverhalten von Mischschrotten sowie Karosseriefractionen zu bewerten. Die analysierten Messungen sind teilweise veraltet und entsprechende Emissionsausreißer auf den zurückliegenden Stand der Technik zurückzuführen.

Mit der segregierten Analyse der Emissionsaufzeichnung in Kapitel 7.3.4 wird der stoffstrombasierte Effekt des Vormaterials messtechnisch im Detail belegt und empirisch gewichtet. Durch die Betrachtung der Messwerte auf der Mikroebene, in Form von erhobenen Einzelwerten und kalkulierten Halbstundenmitteln, lassen sich wesentlich breitere Informationen über das stoffstrom- und ereignisgesteuerte Emissionsverhalten eines Schredders sammeln. Aus der Kombination von Messhistorie und Fallstudie sind schließlich folgende Erkenntnisse für den weiteren Umgang mit Emissionsmessungen an Schredderanlagen festzuhalten:

1. Wechselnde Betriebszustände der Anlage habe einen Effekt auf das Emissionsverhalten des Schredders.
2. Die Varianz in der inhaltsstofflichen Zusammensetzung des Vormaterials kann auch in derselben Sortenklasse zu unterschiedlichen Emissionskonzentrationen in der Prozessluft führen.

3. Die stoffstrombasierte Häufigkeitsverteilung der Emissionswerte birgt die Möglichkeit der strategischen Mengenverteilung oder -reduzierung im Input des Schredders.
4. Die Untersuchung der Schadstoffkomponenten, speziell der TVOC-Inhaltsstoffe ist hilfreich, um eine Abluftnachbehandlungseinrichtung verfahrenstechnisch sauber auszulegen.
5. Das schließt die Untersuchung der Reststoffbeladung im Schadgas des Windsichters mit ein.
6. Die Abgasreinigung hat gesamtheitlich für die Schredderanlage und ihre Produktionseinheiten zu erfolgen (Mühle, Windsichtung, Übergabestationen, Sortierstände usw.).
7. Eine Wirkungsgradanalyse von installierten Abluftnachbehandlungssystemen ist nur unter der Erfassung der Roh- zur Reingaszusammensetzung und in Verbindung mit einer langfristigen Messstudie nachhaltig.
8. Der Funktionalitätsnachweis einer etablierten Abluftreinigungsanlage kann über eine qualitative Kontrolleinrichtung als Einzelmessung erfolgen.
9. Die Forderungen des TA Luft-Entwurfes sind für den Gesamtstaub weniger kritisch, als die Einhaltung der TVOC-Grenzwerte und geforderten Bagatellmassenströme.
10. Die klassische Kombination aus Zyklon, Nasswäscher- und/oder Schlauchfiltersystemen ist für eine TVOC-Reduktion gemäß den Forderungen des TA Luft-Entwurfes unzureichend [31].

Auf operativer Ebene fordern besonders Messprojekte im Umfang der beschriebenen Fallstudie zeitliche und monetäre Ressourcen, die den normalen Betriebsablauf übertreffen. So stellt die Extraktion der erhobenen Messdaten und Umformung dieser in verwertbare Kennzahlen bzw. Informationen, einen unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand dar und verlangt darüber hinaus eine etablierte transparente Produktionsdatenführung. Des Weiteren ergeben sich praktische Herausforderungen in der separaten Dokumentation und Lagerung von Schrotten im Vormaterial und der gezielten chargenbezogenen Auswertung der Produktzusammensetzung.

Das Kapitel 7 ermittelt des Weiteren keine Korrelation zwischen den gemessenen Staub- und TVOC-Emissionen und erhebt infolgedessen keinen Anspruch auf Vollständigkeit der Datenauswertung. Diese und weitere Untersuchungen sind möglich, um tiefgreifendere Erkenntnisse über den emissionstechnischen Stoffstromeffekt zu erhalten, wären in Anbetracht der hinreichend nachgewiesenen TVOC-Herausforderungen für den Schredder, zunächst aber nur eine Ergänzung und würden den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen.

Aus den gesammelten Erkenntnissen der Kapiteln 6 und 7 lässt sich schließlich ein Leistungsverzeichnis für den idealen Schredder ableiten. Diese emissions- und produktionstechnischen Randbedingungen werden im nachfolgenden Kapitel 8 unter den Herausforderungen in der Schredderbestandstechnik zusammengefasst.

## 8 Herausforderungen in der Schredderbestandstechnik

Hauptaufgabe dieses Kapitels ist die Zusammenführung der in Kapitel 6 und 7 gelieferten Erkenntnisse über die Theorie und Praxis des betrieblichen Immissionsschutzes. Dabei versteht sich dieser Teil der Dissertationsschrift weniger als detailkonstruktiver Leitfadens für den Schredder der Zukunft. Es geht vielmehr um die Erschaffung einer Bewertungsmatrix oder eines gewichteten Lastenheftes bzw. Leistungsverzeichnisses, mit welchem die installierte und teilweise überholte Bestandstechnik, in einen Abgleich mit den neuen organisatorischen und technischen Herausforderungen gebracht werden kann. Des Weiteren wird aufgeklärt, welche prozessanalytischen Voraussetzungen heute bereits geschaffen werden müssen, um das Risiko einer Anlagenverbesserung bewertbar zu machen. Das Kapitel 8 legt die Randbedingungen für den Innovationsgedanken des Kapitels 9 strukturell fest.

### 8.1 Säule 4: Bestandstechnik

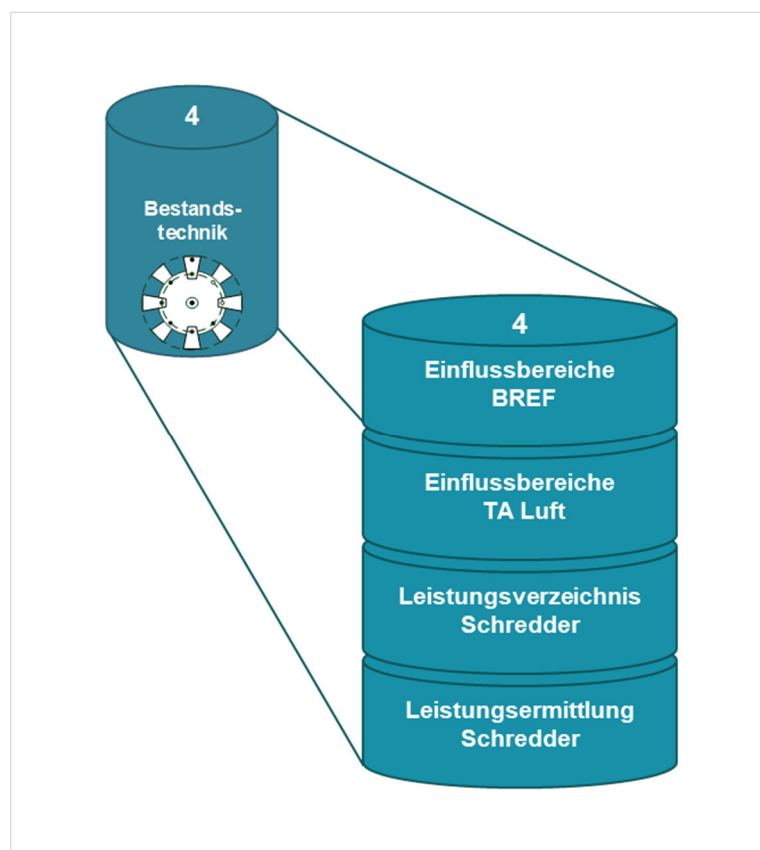


Abbildung 34: Säule 4: wesentliche Systembausteine in der Evaluation der Bestandstechnik

Als wesentlicher Einflussbereich im Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen, liegt die Säule 4 im Fokus der branchenbeteiligten Unternehmer. Der Zustand und



der Fortschritt der altgedienten Anlagen sind der Grundstein, auf dem die Entscheidungen über eine Investition in die Zukunft getätigt werden. Dieser strategische Entscheidungsprozess hängt von mehreren Parametern ab (siehe Abbildung 34). So besteht die Säule 4 aus verschiedenen Bausteinen, die sowohl emissionstechnische, betriebsorganisatorische und monetäre Gesichtspunkte abdecken.

Durch die Selektion der kritischen Einflussbereiche aus dem BREF und der TA Luft-Novelle, entsteht ein strukturiertes Gesamtbild über den Einflussbereich der neuen Gesetzgebung. Das hieraus zusammengestellte Leistungsverzeichnis für den zukünftigen Schredder, bildet nicht nur den Grundstein der notwendigen Entwicklungsarbeiten in der Säule 5, sondern schafft die Basis einer kennzahlenbasierten Leistungsbewertung von Schredderanlagen. In Anbetracht der geringen Vergleichbarkeit von Schreddern in der TSR Gruppe, ist das in dieser letzten Phase generierte Controllingwerkzeug, bereits ein erster Entwicklungsschritt im Kreislaufmodell.

## **8.2 Technologische und operative Entwicklungsfelder des Bestandssystems**

Die scharfen Grenzwert- und Strukturbestimmungen des BREF und speziell des TA Luft-Entwurfes sind ein klarer Indikator dafür, dass die heute in Deutschland betriebenen Großschredderanlagen strenggenommen mit dem Inkrafttreten der Umsetzungsfristen existenzgefährdet sind. In den folgenden Abschnitten wird diese These weiter behandelt und an ausgewählten Forderungen des umweltschutzrechtlichen Regelwerkes belegt.

Die Grundlage der Bestandstechnikevaluation bilden sowohl emissionstechnische, als auch organisatorische Parameter. Die folgende Liste fasst die wesentlichen Bezugsgrößen für die Bestandsbewertung stichpunktartig zusammen:

1. Ein umfassendes UMS bestehend aus
  - a. dem Emissionsquellenverzeichnis,
  - b. dem Abfall- und Stoffstrommanagement inklusive umfangreichen Regelungen zum Umgang mit diffusen Emissionen,
  - c. dem Ressourcen-/Reststoff- und Energieeffizienzplan,
2. scharfen Forderungen zur technischen Aufbereitung gefasster Emissionsquellen,
3. einem erhöhten Verwaltungsaufwand in einer Genehmigungssituation.

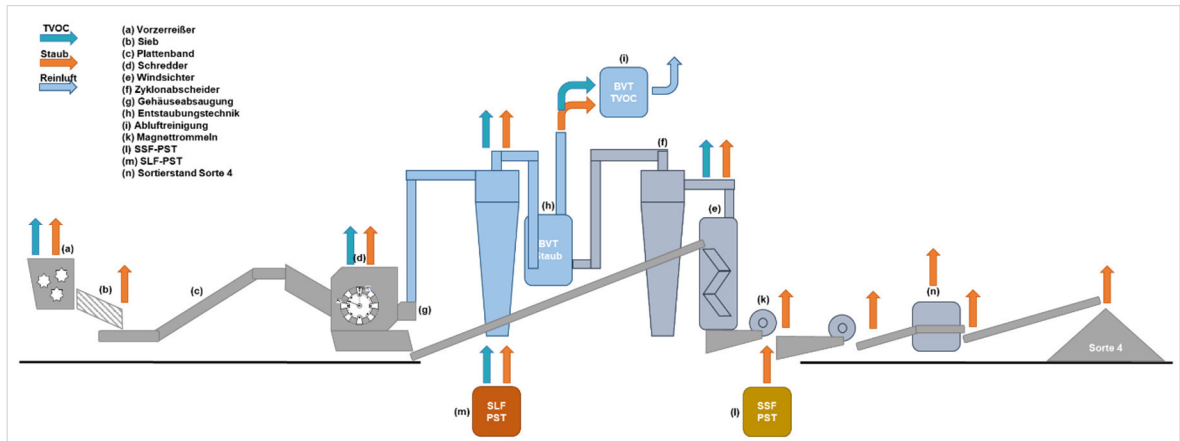
Der Fortbestand einer Altanlage ist maßgeblich und unabhängig der behördlichen Ermessensgrenzen, in diesem ersten Ansatz der Plausibilisierung, an alle neuen rechtlichen Rahmenbedingungen geknüpft. Sollte eine Bestandsanlage also langfristig nicht in der Lage sein die speziell in Kapitel 6.3 geforderten Rahmenbedingungen zu erfüllen, ist mit einer Anlagenstilllegung zu rechnen.

## **8.2.1 UMS an Schredderanlagen**

Alle mit einem erhöhten Verwaltungsakt verbundenen Forderungen des UMS sind organisatorisch abbildbar, aber mit erhöhten Betriebskosten verbunden und nicht zwangsläufig betriebsfördernd (bspw. die Forderung nach vordefinierten Aufbau- und Ablauforganisationen). Des Weiteren verbergen sich hinter den Forderungen für das übergeordnete Systemmanagement, technische Notwendigkeiten. Die Erfassung und transparente Bewertung von Energie- und Verbrauchsdaten, kann nur unter der Verwendung geeigneter Mess- und Regelungstechnik funktionieren. Mit dem systematischen Ausbau des UMS, und damit streng genommen vor der Anpassung verfahrenstechnischer Abläufe im Produktionsprozess, werden bereits technische Grundvoraussetzungen der Schredderanlage definiert.

### **8.2.1.1 Emissionsquellenverzeichnis**

So steht ein Emissionsquellenverzeichnis nicht mehr allein für den verwaltungstechnischen Akt der Lokalisation und messtechnischen Erfassung der Schadstoffbelastung, sondern langfristig auch für die Definition und Implementierung geeigneter Emissionsminderungsmaßnahmen. Das UMS bewegt den Betreiber dazu, sich mit seinem Bestandsprozess enger auseinanderzusetzen und die Inventarisierung sowie Nachweisführung zu professionalisieren. Zukünftig ist damit eine digitalisierte Vernetzung der Produktionseinheiten und ihrer Maschinenelemente sinnvoll. Das UMS ist auf diese Weise nicht länger ein reines Verwaltungs- und Kontrollinstrument, sondern wird Bestandteil des operativen Schreddergeschäfts.



**Abbildung 35: Potentielle Emissionsquellen an Schredderanlagen in Anlehnung an das neue UMS**

Abbildung 35 zeigt in Anlehnung an die in Kapitel 7 aufgeführte Emissionsquellenübersicht (Abbildung 20) die wesentlichen, unter den neuen Vorgaben zu berücksichtigenden Emissionsquellen auf. Die Farbgebung aus orangen und blauen Pfeilen verdeutlicht die Bandbreite der potentiellen Emissionsquellen in die Luft und veranschaulicht über Abbildung 20 hinaus, wie weit das UMS in den Schredderprozess eingreift. So gilt es zukünftig jede verfahrenstechnische Verarbeitungs-, Umschlag- und Transportstufe zu erfassen und geeignete Minderungsmaßnahmen dafür abzuleiten. Das Konzept ist allumfassend und betrifft die komplette Produktionssegmentierung im Schredderprozess, von der Materialannahme, Schredderbeschickung, über den eigentlichen Zerkleinerungs- und Aufbereitungsprozess im Segment 4 bis zur Produkt(zwischen)lagerung und Verladung (siehe rückblickend auch Abbildung 3).

Damit übersteigen die hier aufgezeigten Bereiche konsequenter Weise auch die in Kapitel 3.1.2.1.1 des BREF aufgeführten potentiellen Luftemissionsquellen an Schreddern.

### 8.2.1.2 Abfall- und Stoffstrommanagement

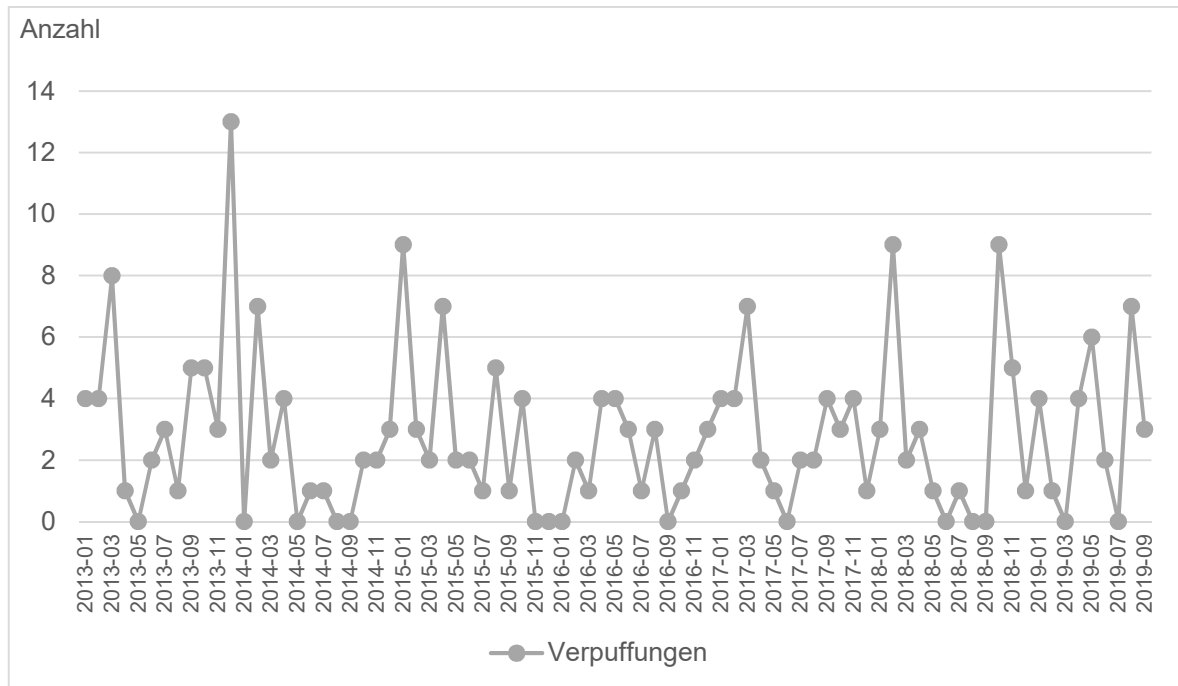
Weitere Parallelen zum betrieblichen Einflusspektrum des UMS finden sich im Abfall- und Stoffstrommanagement. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Forderung von Emissionsminderungsmaßnahmen. Die vordefinierten Ausführungsbestimmungen (siehe auch Kapitel 6.2.2 und 6.3.2) sind technisch umsetzbar, weisen in ihrer Formulierung aber eine Detailtiefe auf, die teilweise konträr zu der geläufigen Praxis steht (bspw. Abfallbeprobung und Mengenprognosen) oder bereits in anderen Verwaltungsvorschriften geregelt ist. So erscheint die Nennung von Maßnahmen im Umgang mit Karossen oder Altfahrzeugen die

Betriebsflüssigkeiten usw. enthalten, in der TA Luft deplatziert. Die AltfahrzeugV führt bereits entsprechende Direktionen zur Trockenlegung in Altautodemontagebetrieben und beschreibt die Anforderungen für Schredderanlagen [56] [58]. Werden die Maßnahmen zur Detail- und Stichpunktkontrolle von Fahrzeugen oder Karossenpaketen in Form der Dekompaktierung o.ä. Pflicht, muss mit Installationen zur mechanischen Vorbehandlung (Teildemontage) des Inputmaterials geplant werden.

Die Anforderungen des Abfall- und Stoffstrommanagements übersteigen bereits in diesem Schritt den üblichen visuellen Befundungsaufwand am Schredder. Inwiefern diese Maßnahmen mit dem übergeordneten Emissionsminderungsgebot kompatibel sind, ist des Weiteren im technischen Gesamtkonzept des neuen Schredders zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 6.2.10 und 9.2.2).

In Hinblick auf limitierte Personalressourcen und fachliche Fehlerpotentiale, ist der Einsatz automatisierter Erkennungssysteme als Ergänzung zur mechanischen Vorbehandlung im Annahme- und Befundungsprozess zu überprüfen. Die unterschiedlichen Interessensfelder decken sich bei der Anwendung der BVT in diesem Entwicklungsfeld nicht zwangsläufig. Wo die Gesetzgebung primär die Reduktion von Emissionen im Rahmen des geregelten Abfall- und Stoffstrommanagements verfolgt, hat der Anlagenbetreiber starkes Interesse an der Verringerung von Schäden als Folge der Störstoffverarbeitung. Dieser Aspekt berührt besonders den Umgang mit Hohlköpern und Druckbehältern sowie Schwerteilen im Vormaterial, welche kapitale Schäden an der Anlage verursachen können.

Die unter Kapitel 3.1.2.1.1 im BREF geführte Festlegung, dass Verpuffungen bei einer effizient geführten Schredderanlage weniger als einmal pro Jahr zu verzeichnen sind, kann unabhängig von den dort genannten Präventivmaßnahmen, als solches in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Abbildung 36 zeigt einen Auszug von Verpuffungen an einer Referenzanlage der TSR unter dem Einsatz der Semi-Wet-Technologie (Wasser- bzw. Additiveindüsung in das Schreddergehäuse) und deckt sich teilweise mit den im BREF aufgeführten Statistiken.



**Abbildung 36: Erfassung von Verpuffungsereignissen an einem Großschredder im Zeitraum 2013 bis 2019**

Es wird hierzu weiter angemerkt, dass die im BREF gelisteten standortspezifischen Ereignisse ohne das referenzstandortübliche Inputsortenspektrum abgebildet sind. Die Zahlen sind für den mischschrott-, karossen- und konsumgüterverarbeitenden Großschredder mit einer Durchsatzleistung von mehr als 60 t/h, in dieser Form nicht repräsentativ. Wenn das BREF Anlagen in eine statistische Auswertung einbindet, ohne den Bezug zum Inputmaterial herzustellen, werden Benchmarks für die BVT erzeugt, die die Realität verzerren bzw. der Praxis nicht gerecht werden.

Unter den in Kapitel 4 genannten Gesichtspunkten der strategischen Marktbedienung, besteht zukünftig eine noch größere Notwendigkeit in der flexiblen Materialannahme. Eine primäre Aufgabe des Großschredders fällt zukünftig in die Verarbeitung noch komplexerer Schrotte. Bei der Weiterentwicklung einer solchen Anlage ist folglich zu berücksichtigen, dass die emissionstechnischen Effekte des Vormaterials nicht stets kalkulierbar und einzudämmen sind. Und dass ferner Technologien gefordert werden, die keine reine Neuinterpretation der veralteten mechanischen Pre-Schreddertechnik darstellen.

Unter der Voraussetzung, dass der Schredder weiterhin das gesamte stoffstromgelenkte Marktpotential bedienen wird, fällt das UMS, entgegen der in Kapitel 6.2.1 dieser Dissertation formulierten Option zur Anpassung der Nebenbestimmungen, entsprechend umfangreich aus.

In diesem Zusammenhang fordert der anwachsende Umgang mit verschiedenen Eingangssorten und Qualitäten im Output, ein optimiertes Lagermanagement. Unter Berücksichtigung der BVT 4 und 5 (Kapitel 6.2.4 und 6.2.5) greifen hier sowohl sicherheitsrelevante bzw. bauliche (Brandschutz), als auch emissionstechnische Bedingungen (Umschlag). Die geforderte Trennung der unterschiedlichen Inputsorten ist produktionstechnisch sinnvoll und operativ dann abbildbar, wenn die infrastrukturellen Gegebenheiten den Freiraum dafür einräumen.

Bereits heute ist davon auszugehen, dass ohne Ausnahme einer Bestandsschutzregelung und bei steigenden Überkapazitäten im Markt, kein neuer bzw. zusätzlicher Großschredder mehr in Deutschland gebaut und genehmigt wird. Die Neuauflage eines Schredders unter der Einhaltung der hier diskutierten umweltschutzrechtlichen Bestimmungen, hat demzufolge im Altbestand und auf teilweise eingeschränkten Nutzflächen zu erfolgen (siehe rückwirkend hierzu auch Kapitel 6.5). Eine monochargierte Verarbeitung des Vormaterials wäre dadurch u.U. eingeschränkt.

Neben den produktionstechnischen Einbrüchen im Zuge des temporären Marktaustritts als Folge der Anlagenstilllegung im Errichtungsprozess, muss berücksichtigt werden, dass eine optimierte Lagerwirtschaft unter räumlichen Einschränkungen, einer hohen Umschlaggeschwindigkeit bedarf [59]. Die verschärften Forderungen des TA Luft-Entwurfes zur Wareneingangskontrolle und Lagertrennung, binden perspektivisch jedoch so viele Kapazitäten, dass der Arbeitsprozess vor dem Schredder erhöht und die Durchsatzleistung der Anlage reduziert wird. Einen ähnlichen Effekt beschreibt das BREF in Kapitel 3.1.2.1.1 bei dem Einsatz eines Vorzerreißers. Wobei anzumerken ist, dass die bemängelten Durchsatzeinschränkungen dieser Pre-Schreddertechnologie, durch ein geeignetes Schichtmodell kompensiert werden können.

Ferner kollidiert die erhöhte Materialumschlagshäufigkeit mit den letztlich Forderungen der BVT 5 zur Verringerung des mit dem Handling und dem Umschlag von Abfall assoziierten Umweltrisikos.

Der Abfallumschlag beschränkt sich hier nicht allein auf die Annahme (Vorbehandlung) und den Absatz. Er deckt den gesamten Logistikbereich des Schredderprozesses ab und formuliert entsprechend umfangreiche Anforderungen an dem Umgang mit diffusen Emissionen (siehe Kapitel 6.2.9).

Aus Sicht der Betriebsorganisation führen diese Anweisungen in Summe zu erhöhten Kostenstrukturen. Umfangreiche Annahmekriterien bei einer erhöhten Diversifikation im Stoffstrommanagement, fordern flexible Lagerstrategien und führen letztendlich zur der Reorga-

nisation der gesamten Betriebseinheit. Streng genommen resultiert dieselbe Umschlagmenge – als die über den Prozess bewegte Gesamttonnage – in einer gesteigerten Umschlagleistung, ohne den Effekt der Prozesskostenoptimierung und einer schlankeren Infrastruktur. Die Ausdehnung der Transportstrecken, Übergabestationen, Bunker und dafür notwendige Staubbindemaßnahmen erhöhen die Summe an bewegten Teilen im Gesamtprozess. Investitions-, Energie- und Instandhaltungskosten in Form der Inspektion, Reparatur und Wartung (IRW) steigen.

Interessant verhält sich dieser Sachverhalt in Bezug auf den technischen und monetären Aufwand beim Transport und der geschlossenen Lagerung flugfähiger Fraktionen, wie der SLF sowie Schreddersanden oder Stäuben aus der Abluftnachbehandlungstechnik. Unter der Annahme, dass der Anteil der Restfraktionen aus den Schredderrückständen zukünftig steigen wird, sind semiversiegelte Pufferlager mit hohen Lagerkapazitäten langfristig obsolet bzw. nur als flüssigkeitsdichte Materialpuffereinrichtungen im Anlagenausfall einzuplanen. Die Beschränkung der Lagermengen, baulich versiegelte Ausführungen der Lager- und Umschlagflächen, verschärfte Brand- und Sicherheitskonzepte sowie definierte Reinigungsmaßnahmen für staubende Abfälle, verändern das klassische Betriebskonzept des massenleistungsfähigen Großschredders langfristig. Als entwicklungstechnische Optionen ergeben sich aus heutiger Sicht und ohne die notwendige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

- die Reduzierung der Entsorgungsmengen in Folge der erhöhten Wertschöpfungstiefe,
- die vorgelagerte Inputsortenqualifizierung,
- die gesteigerte Umschlaggeschwindigkeit im Absatz und/oder
- die Begrenzung der Durchsatzmengen durch den Einsatz eines leistungsverringerten Schredderaggregats.

Ob der Ansatz der Kostenreduktion durch den Einsatz kleinerer Aggregate bei erhöhten Qualitätsanforderungen der Abnehmer die Lösung der hier gestellten Problemstellung ist, wird im Laufe des Kapitels 9.3 geklärt.

### **8.2.1.3 Ressourcen-/Reststoff- und Energieeffizienzplan**

Die Leistungsverringering der Anlage birgt Potentiale in der Verbesserung der Energieeffizienzsteuerung. Die Implementierung des Energieeffizienzplans als Teil des UMS folgt

dem Emissionsquellenverzeichnis und gestaltet einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (Kapitel 6.2.13). In Unternehmen mit einer Zertifizierung nach ISO 50001 ist der nachweisgeführte und effiziente Umgang mit thermischen und elektrischen Potentialen ebenso relevant, wie der effiziente Ressourceneinsatz unter dem Abfall- und Stoffstrommanagement. Die Anforderungen an die Erfassung von mobilen (Telemetrie) und stationären Maschinen- und Betriebsdaten sowie deren Auswertung gegenüber den Behörden, wird zukünftig eine zentrale Rolle in der Nachweisführung spielen und ist in der neuen Schredderanlage prozessleittechnisch sowie organisatorisch vorzusehen.

Die Inventarisierung der energetischen Verbraucher ist u.a. über digitale Zählerinstallationen effizient abbildbar. Elektroinstallationen und Mittelspannungseinrichtungen sind bei Altschredderanlagen infrastrukturell oft gebündelt und werden über einen oder wenige zentrale Zähler abgelesen. Bei einer Modernisierung wesentlicher Elektronikeinrichtungen in Form der Erweiterung oder Änderung, können u.a. neue Prüfrichtlinien des Sachversicherers nach VdS (speziell VdS 2871) greifen. Das Nachrüsten von Blindstromkompensationsanlagen ist in diesem Zusammenhang ein geläufiger Standard, betriebswirtschaftlich sinnvoll und wird im Rahmen der ISO 50001-Zertifizierung sukzessive verlangt.

Überdies fordern bauliche Veränderungen an der Anlage u.U. energetische Maßnahmen in Form der Wärmerückgewinnung und/oder Rekuperation. Ganz besonders in Hinblick thermischer Abgasreinigungseinrichtungen, kann der Aspekt der Energierückgewinnung von Belang sein.

Die elektrische und energetische Modernisierung älterer Bestandsanlagen ist folglich mit hohen Kosten verbunden. Der Hauptantrieb des Schredders deckt i.d.R. den wesentlichen Anteil des anlagenspezifischen Energieverbrauches ab. Damit ist der Energieeffizienzplan maßgeblich durch den Zerkleinerungsprozess limitiert (siehe hierzu auch Kapitel 8.3.1.2). Energetische Einsparmaßnahmen in den Nebenantrieben machen sich infolgedessen nur geringfügig bemerkbar, können aber im Rahmen der besagten Zertifizierung durch betriebliche Maßnahmen (Einsparung von Betriebs- und Einsatzstoffen o.ä.) ergänzt werden. Gegenteilig führt die Installation neuer Abluftaufbereitungstechniken u.U. zu einer Erhöhung des Energiehaushalts und verhält sich damit konträr zu den Energieeinsparverordnungen des BREF und der TA Luft-Novelle (u.a. Nummer 5.2.11.2).

Die Wiederverwendung bzw. Rückführung von Roh- und Reststoffen in den Verarbeitungsprozess (BVT 11) fällt ebenfalls unter die potentiellen Einsparmaßnahmen an Schreddern und kann bei dem Einsatz gewisser Abgasreinigungseinrichtungen oder der Anlagenbeschickung von Bedeutung sein. Streng genommen ergeben sich nur wenige echte Möglichkeiten des Betriebsstoffrecyclings an Schredderanlagen und es bleibt ungewiss, wie weit



das Thema durch die Behörden als Auflage gelebt wird. Wesentliche Einsparbereiche finden sich in der Reaktivierung von Prozesswasser- und Prozessluft sowie Schmierölen. In Verbindung mit der Desorption von AK jedoch, könnte ein weiteres Einsparpotential im Reststoffrecycling geweckt werden.

Aus der Prämisse der Stoffstromsondierung oder gezielten Vorkonditionierung des Vormaterials heraus, lassen sich weiter sowohl energetische, als auch reststoffrelevante Effekte ableiten. Das Bewusstsein über die energetischen Effekte des verarbeiteten Inputstroms ist insofern essentiell, dass die Installation energieoptimierender, durchsatzunterstützender Assistenzsysteme, wie der Shredder-Drive-Assistent oder Smart-Shredding-Systeme (SDA/SSS) allein nicht ausreicht, um die Effizienz einer Schredderanlage auszureizen [60]. Die Systeme sind ausschließlich reaktiv und funktionieren dann optimal, wenn sie im Volllastbetrieb der Mühle arbeiten und der Zuführstrom am Schredder kontinuierlich und mengentariert erfolgt. Das BREF formuliert in den BVT 28 das Überladen des Schredders als eine zu vermeidende Maßnahme. Ein Unterladen der Anlage, ist unabhängig von Unterbrechungen im Zuführstrom, aber ebenfalls relevant. Neben dem organisatorischen Aufwand, stecken hohe Investitionskosten in der steuerungstechnischen Ausstattung, sodass gerade bei kleineren Aggregaten (bis 800 PS) über deren Sinnhaftigkeit nachgedacht werden muss.

Ferner spart eine automatisierte Rückführung unaufgeschlossener Fraktionen in den Zerkleinerungsprozess den Einsatz von Umschlaggeräten. Dieses Feld deckt sich teilweise mit den Forderungen des vorgelagerten Stoffstrommanagements zur Reduzierung der Umschlaghäufigkeit. Mit dem Unterschied, dass dieses Segment vorrangig durch die energetischen/betriebsstofflichen Einsparungen in der internen Betriebslogistik bestimmt wird. Die Aufbereitung von Reststoffen und/oder das Upgrading von Abfällen durch einen weiteren Aufbereitungsprozess, schließt an die angeführte Reduzierung der Entsorgungsmengen an, ist aber energetisch und ressourcentechnisch insofern interessant, dass diese Fraktionen nicht unter erhöhtem logistischem Aufwand aus dem Prozess ausgeschleust und entsorgt werden (externer Transportaufwand). Ein Effekt, der sich wiederum positiv auf die Mengen diffuser Emissionen (Gesamtstaub) auswirkt.

## 8.2.2 Maßnahmen zu gefassten Emissionen an Schreddern

Entgegen den vorgelegten, primär betrieblichen Schritten zur Eindämmung diffuser Emissionen, verlangt der Umgang mit gefassten Emissionsquellen einen wesentlich tieferen wissenschaftlichen Einstieg in die Abluftreinigungstechnik. So lässt sich eine Produktions- und Bestandsmengenreduzierung bspw. nicht direkt auf die Reduzierung von Emissionen in gefassten Quellen ableiten, obwohl ein positiver Effekt bei den diffusen Emissionen einschlägig ist.

Im Kontext der hier geführten Fragestellung zum Weiterentwicklungsaufwand in der Bestandstechnik, werden nur solche Herausforderungen hervorgehoben, die entweder einen kritischen Einfluss auf den Fortbestand der Anlagen nehmen oder weiterer Betrachtung in der Säule 5 des Systemkonzepts bedürfen.

Die im BREF und der TA Luft-Novelle festgelegten Behandlungsmaßnahmen inklusive der assoziierten Emissionsbandbreite und entsprechender Grenzwertbestimmungen für gefasste Quellen, finden sich in den Kapitel 6.2.7 und 6.3.2 dieser Arbeit.

Im TA Luft-Entwurf stellen die Vorgaben zum Gesamtstaub eine Verschärfung gegenüber dem europäischen Standard dar (BVT 8). Die gesetzte 10 mg/Nm<sup>3</sup>-Grenze für Altanlagen entfällt, sobald an der etablierten Abgasreinigung (primär der Direktentstaubung des Rotorraumes) eine wesentliche Änderung vorgenommen wird. Der infolgedessen geltenden Grenzwerte von 5 mg/Nm<sup>3</sup> kann mit der klassischen Nassabscheidertechnik nicht eingehalten werden [56]. Bereits unter den Vorgaben zum Gesamtstaub müssen betroffene Schredderbetreiber also mit umfangreichen, konstruktiven Erweiterungen der Abgasreinigungstechnik kalkulieren.

Das BREF nennt den Venturi-Wäscher (Dispensionsabscheider) neben den Druckentlastungsklappen als wesentliche Komponente im Entstaubungssystem und Sicherheitseinrichtung gegen die Auswirkungen einer Verpuffung in der Mühle [30]. Im Gegenzug dazu ist das Semi-Wet-Verfahren keine nachhaltige Alternative. Der Umgang mit Verpuffungsereignissen bleibt auch in der Zukunft ein Entscheidungskriterium bei der Auswahl der Abluftnachbehandlungstechnik. Trocken- bzw. Schlauchfiltereinrichtung sind in der Lage die scharfen Grenzwerte einzuhalten, jedoch im Falle einer Verpuffung oder verzögerten Gasentzündung in der Peripherie explosions- bzw. brandgefährdet (Zerreißen der Filterschläuche oder Staubbrand) [28] [30].

Für den Umgang mit den neuen Grenzwertbestimmungen zum TVOC verhält es sich ähnlich effektiv. Die Einhaltung der gesetzten TVOC-Grenze von 50 mg/Nm<sup>2</sup> ist im BREF ein Richt-, in der TA Luft-Novelle ein Grenzwert.

Die Ergebnisse der Kapitel 7.3.3 und 7.3.4 machen deutlich, dass der Einsatz eines Nassabscheiders für die Behandlung des TVOC in der Abluft des Schredders unzureichend ist. Überdies ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz eines Nassabscheiders eine medienübergreifende Verschleppung von Schadstoffen bedeutet. Die in der Luft bewegten Schadstoffe werden im Prozesswasser (Waschflüssigkeit) gebunden und müssen anschließend nachbehandelt werden. Der Energiebedarf solcher Einrichtungen ist darüber hinaus i. d. R. höher, als bei filternden Entstaubern [28] [30].

Das zukünftige Abgasreinigungskonzept muss in Folge der genannten Parameter flächendeckend eingesetzt werden, grenzwert- und sicherheitskompatibel ausgelegt sein (brand- und druckstoßfest), energetisch effizient arbeiten und Schadstoffverschleppungen medienübergreifend vermeiden. Dieser Ansatz schließt die verschärften Forderungen für PCDD/F und dl-PCB mit ein. Inwiefern sich die aktuellen BVT diesbezüglich am Markt bewähren, wird im Folgekapitel 9.2.2 näher diskutiert.

Die Abluftreinigungsanlage wird auf Basis der ausgewiesenen Leistungsanforderungen zur wesentlichen Bezugsgröße bei der Bestandsbewertung des Schredders. Ein Nachrüsten überholter Ablufttechnik ist entsprechend den genannten Anforderungen akribisch zu überprüfen. Wobei zu berücksichtigen ist, inwiefern die verfahrenstechnischen Anlagenerweiterungen Einfluss auf die Bestandsgenehmigung nehmen (siehe auch Kapitel 6.3.5) und eine Stilllegung aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, dem Umbau vorzuziehen ist.

Ergänzt werden diese verfahrenstechnischen durch betriebliche Maßnahmen im Umgang mit gefassten Quellen. Die mechanische Vorbehandlung des Inputmaterials sowie die gleichmäßige und kontinuierliche Zuführung verhindern Emissionsspitzen. Sie wirken sich darüber hinaus, aber auch energetisch positiv auf den Zerkleinerungsprozess und die Aufschlusswirkung im Rahmen des Full-Box-Shreddings aus [60]. Für den Betrieb eines Schredders ist der vorbehandelte Materialstrom also nicht allein aus umweltrechtlichen Parametern relevant. Ein Einsatz der in Kapitel 3.3.2 genannten intelligenten PLT, kann den Vorgang der Emissionsspitzenreduktion stützen und für die Aufzeichnung umweltrelevanter Daten eingesetzt werden.

Die im Entwurf der TA Luft aufgeführte Forderung über das automatische Abschalten der Schredderanlage in Folge einer Funktionsstörung an der Abgaseinrichtung, ist aus maschinensicherheits-, steuerungs- und brandschutztechnischen Gründen weder zulässig noch möglich und verhält sich überdies konträr zu den Forderungen des Energiemanagements. Inwiefern dieser Absatz in Bezug auf die BVT im europäischen Vergleich tatsächlich zur Geltung kommt, wird der Abschluss der aktuell geführten Verhandlungen auf Verbandsebene zeigen.

Ferner liegen betrieblichen Emissionsminderungsmaßnahmen für gefasste Quellen in der messtechnischen Prozessüberwachung und in der ereignisgesteuerten Dokumentation. Die transparente Nachweisführung von Emissionswerten und Störfällen ist für den Schredderbetreiber zukünftig noch bedeutsamer, als bedenkliche Anweisungen des Gesetzgebers zur Betriebsführung der Anlage. Die neuen Anforderungen zur Datenerhebung und automatisierten Leckageüberwachung (Kapitel 6.2.9) führen einen erheblichen technischen und monetären Aufwand mit sich und sind streng genommen keine rein betrieblichen Maßnahmen. Auf Grund der gewachsenen Strukturen an vielen Schredderanlagen, ist ein Nachrüsten der veralteten Netzwerk- und Regelungstechnik nicht mehr rentabel. Das hat zur Folge, dass ein Großteil der geforderten Überwachungstätigkeiten händisch als Einzelmessungen oder durch zusätzliche Wartungszyklen einzuplanen sind.

Ziel der organisatorischen Umweltmaßnahmen sollte sein, dass sich Betreiber noch intensiver mit den Auswirkungen ihres Schredderprozesses beschäftigen und unter ökonomischen Aspekten Verbesserungen implementieren. In der aktuellen Ausführung stellen die nationalen Vorgaben eine Verschärfung gegenüber dem europäischen Standard dar und bedeuten für deutsche Schredderbetreiber einen echten Wettbewerbsnachteil [56].

Eingehende Erläuterungen zu Punkt 3 der Bestandstechnikevaluation (erhöhter Verwaltungsaufwand in einer Genehmigungssituation) werden auf Grund der Schwerpunktlegung im gegenwärtigen Systemkonzept, in Kapitel 10 dieser Arbeit durchgeführt.

### **8.2.3 Neues Leistungsverzeichnis für Schredderanlagen**

Im Folgenden sind die technischen und betrieblichen Erkenntnisse zum Umgang mit den ausgearbeiteten umweltschutzrechtlichen (Heraus-)Forderungen in einem übergeordneten Leistungsverzeichnis zusammengefasst. Der Schredderbestandsprozess lässt sich mit dem nachstehenden Lastenheft abgleichen und für eine Weiterentwicklung qualitativ bemessen.

Folgende Parameter sind für die Planung einer neuen Schredderausführung oder einer Anpassung der Bestandstechnik gemäß BREF- und TA Luft-Konformität, zukünftig zu berücksichtigen:

- Die messtechnische Abdeckung aller gefassten Emissionsquellen (speziell TA Luft Nummer 5.1.2),
- eine gesamtheitliche Reduzierung von diffusen und gefassten Emissionsquellen,
- die Reduzierung der bewegten Teile im Aufbereitungsprozess (emissionstechnisch und energetisch),
- eine effiziente Platz(re)organisation (Sortentrennung, Lagerflächen, Materialflussmanagement, Umschlagshäufigkeit und -geschwindigkeit, Durchsatzmengen, Fahrwege),
- die Brandschutztechnik (VdS-Konformität, Brandfrüherkennung [61], ausreichender Versicherungsschutz),
- eine qualitative Evaluation der Abgasreinigungstechnik (Kompatibilität und Effekte in der Genehmigungslage),
- eine intelligente PLT (Datenschnittstellen vorausgesetzt) gestaffelt in
  - a. ein mobiles und stationäres Datenmanagement mit
  - b. einer flächendeckenden digitalisierten Vernetzung der Produktionseinheiten,
- interaktive Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemata (R&I-Fließbilder), Mess- und Regelungsabläufe (IRW-Status, Energie, Stoffstrom, Emissionen) [32],
- automatisierte Detektionssysteme im Rahmen der Annahme und Befundung (Schwerteile, Batterien, Verpuffungen),
- die energetische Optimierung der Anlage (organisatorische und technische Maßnahmen) und
- flächendeckende Ereignisprotokolle im Sinne der Nachweispflicht (Prozessüberwachung).

Trotz der noch offenen Verabschiedung des TA Luft-Entwurfes, ist aus heutiger Sicht bereits eindeutig, dass ein Eingriff in die Schredderbestandstechnik im Sinne der umweltschutzrechtlichen Änderungen, unumgänglich ist.

Die Bestandstechnik stellt den entwicklungstechnischen Flaschenhals im methodischen Systemkonzept dar, wobei ein Eingriff in die Technik allein nicht ausreichen wird, den Forderungen der formalrechtlichen Seite nachzukommen. Die Weiterentwicklung von Schredderanlagen nimmt Einfluss auf den gesamten Prozess um das Aggregat.

Aus der genannten Notwendigkeit der Prozessverbesserung heraus, stellt sich die Frage nach der Planbarkeit einer effektiven und effizienten Anlagenerweiterung, die in den Folgekapiteln praxisgezogen beantwortet werden soll.

### **8.3 Effektiver Nachweis von Entwicklungsfeldern in der Schredderbestandstechnik**

Die Fülle an emissions- und verfahrenstechnischen Herausforderungen für den Schredder der Zukunft ist so umfangreich, dass eine Konzeptionierung der idealen Prozess- und Verfahrensschritte nur unter der Einbindung von echten Betriebs- und Produktionskennzahlen nachhaltigen Erfolg verspricht. Ohne die Diagnose defizitärer Anlagenbereiche im Bestand, kann das Designkonzept nicht erfolgsversprechend ausgelegt werden. Aus gegebenem Anlass ist die Entwicklung eines produktionsbasierten Controllingtools für die Abbildung von Leistungskennzahlen an Schredderanlagen naheliegend. Ziel ist die Entwicklung eines Controllingsystems, das die Bestandsphysik realitätsnah in der Zahlenwelt abbildet. In den nachkommenden Folgekapiteln 8.3.1 bis 8.3.3 werden die wichtigsten Schritte und Ergebnisse dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeit vorgestellt.

#### **8.3.1 Kennzahlensystem an Schredderanlagen**

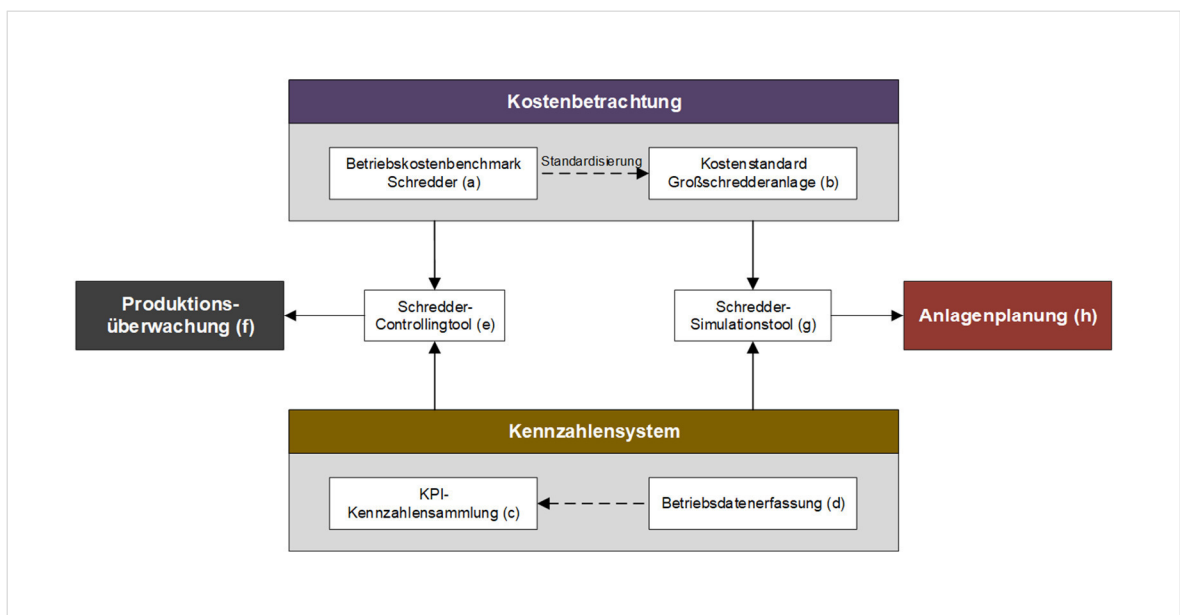
Die Entwicklung eines Schreddertools zur funktionellen und monetären Produktionsüberwachung, fällt unter die taktische sowie operative Planung und läuft damit über das operative Controlling [40]. Die ergebnisorientierte Steuerung und Planung von Produktionsprozessen funktioniert in erster Linie über eine strukturierte Datenerhebung und Analyse dieser.

Für die Abbildung des Schredderprozesses in einem verwertbaren Kennzahlensystem ist essentiell, dass nur solche Größen zur Steuerung herangezogen werden, die im direkten Produktionsumfeld des Schredders liegen [41] und eine entsprechende Aussagekraft generieren. Aus diesem Grund konzentriert sich die Auslegung des Tools im Wesentlichen auf die periodische Erfassung und Auswertung von wertorientierten Produktionskennzahlen direkt am Schredder sowie die nachgelagerte Integration dieser in das Steuerungssystem des Unternehmens (siehe auch Kapitel 9.2.4) [42].

Das entwickelte Schreddertool erfüllt die Funktion eines betriebswirtschaftlichen Werkzeugkastens, mit dem sich die in Kapitel 4.3 genannten Leistungsziele der Produktion abbilden

lassen [62]. Es muss so ausgelegt sein, dass eine wahrheitsgetreue Abbildung der betrachteten Produktionsprozesse sowie deren Wirkzusammenhänge stattfinden und die stoffstromorientierte Bewertung von Leistungsparametern gewährleistet ist. Monetäre und nicht-monetäre Zielgrößen bilden gemäß den Ausführungen in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 das Grundgerüst des Kennzahlensystems.

Das in Abbildung 37 aufgeführte Prozessdiagramm beschreibt die Vorgehensweise bei der vorbereitenden Datenerhebung und Auslegung des etablierten Schreddertools.



**Abbildung 37: Entwicklung eines Kennzahlensystems an Großschreddern [49]**

Die selektive Kostenevaluation von Schredderanlagen in Form eines Benchmarks (a) [41], bildet die erste Phase in der Entwicklung des Auswertesystems. Hierzu wird die Kosten- und Leistungsrechnung an drei Großschreddern in der TSR Gruppe miteinander verglichen. Teil dieses Arbeitsschrittes ist neben der Kostenermittlung der einzelnen Produktionseinheiten am Schredder, auch die Erzeugung von standardisierten verbraucherabhängigen Kostensätzen (b). Diese sind besonders im Zuge der Anlagenneuplanung (h) und Produktionskostensimulation (g) in Kapitel 9.3 der Dissertationsschrift von Relevanz. Auf Basis der ermittelten Kosten- und Kennzahlensammlung lässt sich weiter ein standardisiertes Kennzahlensystem (c) für Schredderanlagen definieren. Die relevanten Kennzahlen werden über Betriebsdaten (d) generiert und zur späteren Produktionsüberwachung in Form des Schreddertools (e) eingesetzt. In Folge dieser Struktur verfolgt das Schreddertool sowohl die Rolle eines operativen Steuerungsinstruments (Produktionsüberwachung (f)), als auch eine Funktion zur Offenlegung von Systemgrenzen und Defiziten unter Anwendung der neuen rechtlichen Rahmenbedingungen als Teil der Geschäftsplanung [20].

### 8.3.1.1 Monetäre Zielgrößen im Schredderprozess

Inhalt dieses Kapitels ist die Herleitung einer standardisierten Produktionskostenermittlung für Schredderanlagen als Grundlage für die Ausarbeitung des stoffstrombasierten Schreddertools. Die Ergebnisse des Kostenbenchmarks aus verschiedenen Schredderanlagen der TSR Gruppe durch die Anwendung des Tools, bilden die Kalkulationsbasis für die Auslegung und Simulation neuer Anlagen in diesem Geschäftsbereich.

Übergeordnetes Ziel der Kostenermittlung ist eine Darstellung der gesamten Produktionskosten auf einer täglichen Bezugsebene, um u.a. die Integration der nicht-monetären Zielgrößen aus Kapitel 8.3.1.3 einzurichten. Des Weiteren werden durch die vereinheitlichte Kostenbetrachtung die Verbrauchergruppen aufgezeigt, die den größten Anteil an den Produktionskosten tragen und demzufolge in den Fokus der Prozessoptimierung rücken.

In Schredderbetrieben wird die Mehrheit der Kosten durch die Fertigung bzw. Produktion verursacht. Auf Grund des hohen Mechanisierungs- und Automatisierungsgrades an Schredderanlagen, ist die Berechnung von Maschinenstundensätzen sinnvoll. Hierzu werden diverse Verrechnungssätze zur verursachungsgerechten Abbildung der Kosten aus dem Schredderprozess herangezogen.

Im Rahmen der Maschinenstundensatzrechnung werden die maschinenabhängigen Gemeinkosten, wie bspw. Energie-, Instandhaltungs- oder kalkulatorische Abschreibungskosten (AfA), auf die Laufzeit der betrachteten Produktionseinheiten bezogen. Der kalkulierte Maschinenstundensatz dient dann der Umlage bzw. Verrechnung der maschinenabhängigen Kosten auf die einzelnen Kostenträger. Die Vorgehensweise zur Kalkulation eines adäquaten Verrechnungssatzes der Maschinenstunden lässt sich schrittweise über die Ermittlung der Maschinenlaufzeit, des Maschinenstundensatzes und der Fertigungskosten gliedern [40].

Wird in einem Produktionsvorgang jede Produktionseinheit anhand einer einzelnen Kostenstelle erfasst, kann der Maschinenstundensatz vereinfacht nach Gleichung (1) berechnet werden.

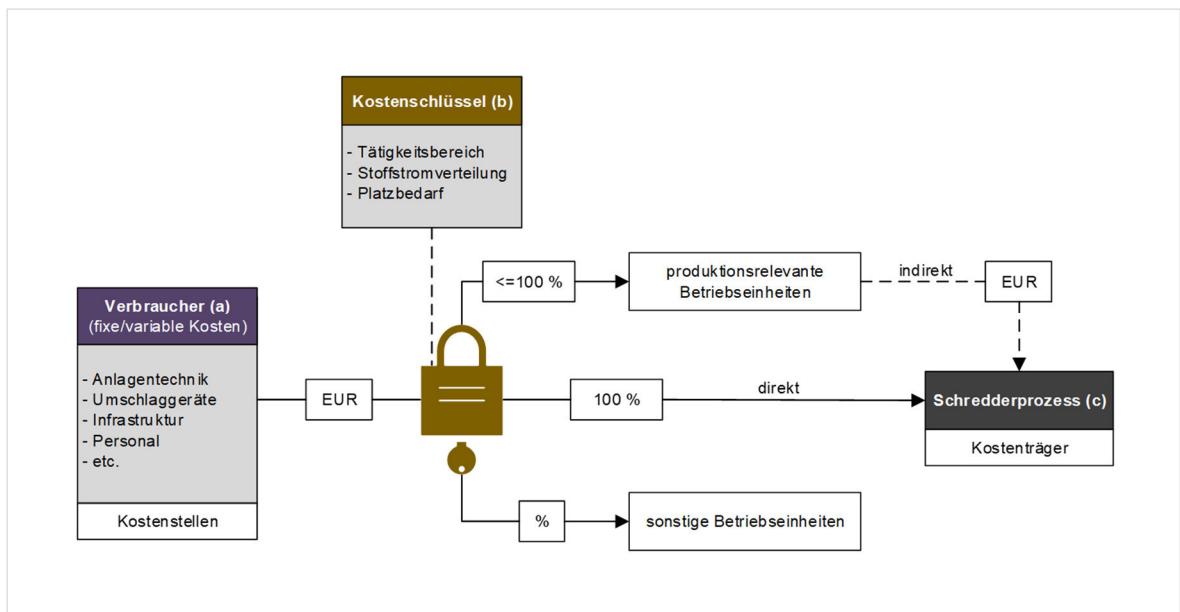
$$K_{MS} = \frac{K_{AfA} + K_Z + K_R + K_E + K_{IRW}}{t_L} \quad (1)$$

Demnach ergibt sich der Maschinenstundensatz ( $K_{MS}$ ) aus der Summe der AfA-, Zins-, Raum/Flächen-, Energie- sowie IRW-Kosten ( $K_{AfA}$ ,  $K_Z$ ,  $K_R$ ,  $K_E$ ,  $K_{IRW}$ ) bezogen auf die betrachtete Laufzeit ( $t_L$ ) der schredderrelevanten Produktionseinheiten in der dazugehörigen Periode [40].



Unter der Voraussetzung, dass die unterschiedlichen Kosten der Betriebs- und Produktionseinheiten separat in Form von Einzelkosten erfasst werden, kann die Zuordnung der für den Schredderprozess relevanten Kostenstellen direkt erfolgen. Alle weiteren, als Gemeinkosten erfassten Größen, gilt es mittels Umlageschlüssel über den BAB den jeweiligen Kostenstellen zuzuschreiben [40] [45]. Die Schredderprozesskostenermittlung erfolgt dabei kalkulatorisch isoliert und unabhängig von sonstigen Betriebseinheiten und Geschäftsfeldern/-tätigkeiten des Schredderstandortes, wie bspw. dem NE-Handel, dem Schneidbrennbetrieb, Stahlspäneflächen und sonstige Anlagen zur Verarbeitung von Schrotten, die nicht als Produktionseinheit dem Schredder zugeteilt sind.

Die Schredderanlage fungiert in der gegenwärtigen Prozesskostenrechnung als übergeordneter Kostenträger, dem es die prozessrelevanten Kostenstellen aus dem Betrieb zuzuordnen gilt. Dem Produktionsvorgang sollen also nur die Kosten zugeteilt werden, die er tatsächlich über die betrachtete Leistungsperiode verursacht [45]. Grundlegend lässt sich die Ermittlung der prozessorientierten Kosten an der Schredderanlage durch die in Abbildung 38 dargestellte Vorgehensweise veranschaulichen.



**Abbildung 38: Spezifische Kostenzuordnung im Schredderprozess [49]**

Im ersten Schritt werden die in den Kostenstellen (a) geführten kostenverursachenden Verbraucher, wie Betriebseinheiten, untergeordneten Produktionseinheiten (Anlagentechnik), Umschlaggeräte, Infrastruktur, Personal sowie Handelsbeteiligungen, dem Schredderprozess (c) in Form fixer und variabler Kosten direkt oder indirekt über einen geeigneten Kostenschlüssel (b) zugeordnet [19]. Die als Prozentwerte ausgelegten Schlüssel werden über

Tätigkeitsbeobachtungen im Betrieb, die Verteilung der Stoffströme und den Platzbedarf der Anlagenoperation bestimmt.

So ergeben sich die beschäftigungsabhängigen variablen Kosten des Schredderaggregats ( $K_{var,An}$ ) ohne die Einbindung des Kostenschlüssels, direkt aus der Summe der Kostenarten im betrachteten Zeitraum und im Verhältnis zu den effektiven Produktionsstunden der Schredderanlage ( $t_{pr}$ ) (Gleichung (2)).

$$K_{var,An} = \frac{K_E + K_{IRW}}{t_{pr}} \quad (2)$$

Aus der Summe der AfA-, Zins- und den sonstigen Kosten ( $K_{sonst}$ ), bezugnehmend auf die Arbeitstage der Produktion ( $d$ ) innerhalb der betrachteten Kostenhistorie, ergeben sich die beschäftigungsunabhängigen fixen Kosten für die Anlagentechnik des Schredders ( $K_{fix,An}$ ) [40] [49]. Gleichung (3) veranschaulicht den kalkulatorischen Ansatz der Fixkostenevaluation.

$$K_{fix,An} = \frac{K_{Afa} + K_Z + K_{sonst}}{d} \quad (3)$$

Die monetäre Bewertung von Umschlaggeräten und sonstiger (semi-)mobilen Betriebseinheiten, erfolgt neben der Kostenaufschlüsselung unter der Verwendung eines Umschlagsfaktors. Hydraulikbagger, Radlader, Raupen, Mobil- sowie Verladekräne und Gabelstapler werden dazu mit der effektiven Produktionszeit des Schredders in ein Verhältnis gesetzt. Diese kalkulatorische Auslegung unterliegt der Annahme, dass Produktionseinheiten über die effektive Produktionszeit hinaus, Arbeiten für den Schredderbetrieb in Form von bspw. Verlade-, Sortier- und Reinigungsarbeiten verrichten. Für die Kalkulation der produktionsgebundenen Kennzahlen im Planungstool, ist eine entsprechende Differenzierung von Produktions- und Anlagenkosten essentiell.

$$a_{Um} = \frac{t_{Um}}{t_{pr}} * \gamma_{Sch} \quad (4)$$

Der Umschlagsfaktor ( $a_{Um}$ ) ergibt sich nach Gleichung (4) aus dem Verhältnis der Betriebsstunden des Umschlaggerätes ( $t_{Um}$ ) und den Produktionsstunden der Schredderanlage im

betrachteten Zeitraum multipliziert mit dem spezifischen Kostenschlüssel ( $\gamma_{Sch}$ ). Anschließend werden nach Gleichung (5) die variablen Kosten des Umschlaggerätes pro Produktionsstunde ( $t_{Um}$ ) berechnet.

$$K_{var,Um} = \frac{K_E + K_{IRW}}{t_{Um}} * \gamma_{Sch} \quad (5)$$

$$K_{var,Pr/Um} = K_{var,Um} * a_{Um} \quad (6)$$

Die Kosten des Umschlaggerätes pro Produktionsstunde am Schredder ( $K_{var,Pr/Um}$ ) ergeben sich damit aus dem Produkt der variablen Kosten pro Betriebsstunde und dem Umschlagsfaktor (Gleichung (6)). Die beschriebene Vorgehensweise ist für alle weiteren Umschlaggeräte entsprechend anzuwenden. Die Berechnung der fixen Kosten für Umschlaggeräte ( $K_{fix,Um}$ ) erfolgt analog zu Gleichung (3) mit Bezug auf den betrachteten Kostenträger. Eine Verteilung der in Sammelkostenstellen erfassten gleichen Maschinentypen oder Anbaugeräten, erfolgt ebenfalls tätigkeitsbezogen.

Sind die dem Schredderaggregat zugewiesenen Personalkosten in einer separaten Kostenstelle erfasst, können diese der Anlage direkt ohne die Verwendung des Kostenschlüssels zugeordnet werden. Die Umlage der sonstigen Personalkosten aus den Platzmitarbeitern, administrativen Verwaltungsangestellten und dem Handel, erfolgt gemäß der spezifischen Stoffstromverteilung am Schredder. Das Verhältnis aus den produzierten Schreddermengen und der Gesamthandels- bzw. -umschlagsmenge des Standorts, generiert den Personalverrechnungsschlüssel.

Bei der Berechnung der variablen und fixen Personalkosten wird zwischen dem Fremdpersonal und den Festangestellten unterschieden. Personalkosten für Festangestellte gelten ausschließlich als Fixkosten und ergeben sich aus Gleichung (7).

$$K_{fix,Pers} = \frac{K_{Lo} + K_{Sonst}}{d} * \gamma_{Sch} \quad (7)$$

Die fixen Personalkosten ( $K_{fix,Pers}$ ) rühren folglich aus der Summe der Lohnkosten ( $K_{Lo}$ ) sowie sonstiger Kosten in Bezug auf die Produktionstage der Periode, multipliziert mit dem stoffstrom- bzw. mengenbasierten Kostenschlüssel am Schredder. In der Produktionskostensimulation werden die durchschnittlichen variablen Personalkosten über das Fremdpersonal abgebildet, da der Einsatz dieses Personals stark vom Produktionsprozess selbst abhängt. Die prozessgesteuerte Fluktuation des Fremdpersonals führt letztendlich zu der Bildung eines variablen Kostengefüges in Form einer stundenbasierten Lohnstruktur [49].

Wie in Gleichung (8) verdeutlicht, berechnen sich die variablen Personalkosten ( $K_{var,Pers}$ ) über das Produkt aus Stundensatz ( $K_{Fremd}$ ), Arbeitszeit ( $t_{Arb}$ ) und dem Kostenschlüssel am Schredder.

$$K_{var,Pers} = K_{Fremd} * t_{Arb} * \gamma_{Sch} \quad (8)$$

Der Umgang mit Schichtzeiten wirkt sich auf die Besetzung und das Lohngefüge an der Schredderanlage aus und muss in der Produktionskostensimulation in Kapitel 9.3 als Variable berücksichtigt werden.

Die Infrastrukturkosten der Schredderanlage sind von den anderen Betriebseinheiten des Standortes segregiert zu erfassen. Die Berechnung der für den Produktionsprozess relevante Infrastrukturkosten aus Miete, Wasser, Licht, Wärme und Instandsetzungsarbeiten, erfolgt über die anteilige Zuschreibung der effektiven Anlagennutzfläche. Der Kostenschlüssel ergibt sich folglich aus der Einmessung der Vor-, Zwischen- und Produktlagerflächen, den Fahr- und Umschlagbereichen sowie den relevanten Gebäudeeinheiten. Flächen oder Gebäude die nicht nur einer Betriebseinheit oder einem einzelnen Geschäftsfeld des Standortes zugeordnet sind, aber zur Wertschöpfung an der Schredderanlage beitragen, können entsprechend der Stoffstromgewichtung oder über eine separate Auswertung der Tätigkeitsschwerpunkte (bspw. anwendbar für den Arbeitsaufwand in Werkstätten) aufgeschlüsselt werden. Die anfallenden Infrastrukturkosten werden als fixe Kosten ausgelegt und berechnen sich nach Gleichung (9) aus der Summe der Miet- ( $K_M$ ), IRW- und Betriebsstoffkosten ( $K_{Betr}$ ) sowie sonstigen Aufwendungen im Verhältnis zu den Produktionstagen des betrachteten Zeitraums.

$$K_{fix,Infra} = \frac{K_M + K_{IRW} + K_{Betr} + K_{Sonst}}{d} * \gamma_{Sch} \quad (9)$$

Konsequenter Weise müssen in der Kostenbetrachtung an Großschreddern auch solche Aufwendungen berücksichtigt werden, die sich aus den übergeordneten betrieblichen, vertrieblichen und kaufmännischen Steuerungsorganen der Unternehmensorganisation ergeben. Die als Handelsbeteiligung definierten Kosten werden in Form einer Umlage an den Standort berechnet. Auch in diesem Anwendungsfall ist eine Aufschlüsselung auf Grundlage der Produktionsmengen sinnvoll.

Gleichung (10) berechnet die spezifischen Fixkosten der Umlage pro Tag aus den Handelskosten im Verhältnis zu den Arbeitstagen der Produktion in der betrachteten Periode.

$$K_{fix,Han} = \frac{K_{Han}}{d} * \gamma_{Sch} \quad (10)$$

Derselbe kalkulatorische Ansatz kann für weitere Kosten aus dem Overhead der Unternehmensführung Anwendung finden.

Zusammenfassend werden die variablen ( $K_{var,Ges}$ ) und fixen ( $K_{fix,Ges}$ ) Gesamtkosten der Anlage schließlich aus den Summen der betrachteten Verbraucherguppen über die Gleichungen (11) und (12) errechnet.

$$K_{var,Ges} = K_{var,Anl} + \sum K_{var,Pr/Um} + \sum K_{var,Pers} \quad (11)$$

$$K_{fix,Ges} = K_{fix,Anl} + K_{fix,Pr/Um} + K_{fix,Pers} + K_{fix,Infra} + K_{fix,Han} \quad (12)$$

### 8.3.1.2 Kostenstandardisierung an Schredderanlagen

Durch die Auswertung der verbraucher-spezifischen Kostenhistorie lassen sich Durchschnittswerte für die weitere Verwendung der fixen und variablen Kosten im Schredder- sowie Planungs- bzw. Simulationstool generieren. Die dem Schreddertool zu Grunde gelegten vergangenheitsorientierte Durchschnittswerte sind ein vereinfachter Ansatz, die tag-basierten Verbrauchsgrößen der Kostenträger, in einer kaufmännisch monatsbasierten Betriebsführung (Monatsabschluss) abzubilden (siehe auch Kapitel 8.3.2) [41].

Die rückwirkende Auswertung dieser Kosten an der jeweiligen Schredderanlage über einen Zeitraum von mindestens drei Jahren, hilft die aggregierten Durchschnittswerte realitätsnah für den Standort auszulegen. Durch die Größe des bewerteten Zeithorizonts können saisonale Marktschwankungen und Preisdifferenzen im Einkauf von Energie, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Lohnveränderungen usw. statistisch ausgeglichen werden.

Wichtig zu verstehen ist, dass die Bezugsbasis aller variablen Kosten und damit auch die rückwirkende Durchschnittswernerfassung, die Produktionsstunde, die Grundlage der fixen Kosten für die Echtzeiterfassung, der Produktionstag ist. Für die rückwirkende Kalkulation der fixen Kosten als Durchschnittswerte, bilden die gesetzlich genehmigten Arbeitstage der Anlage die verwendeten Tagessätze. Das bedeutet ferner, dass eine Standardisierung der ermittelten Prozesskosten (eigentlich Gemeinkosten) nur mehrstufig funktioniert. In der Beschreibung der nicht-monetären Kennzahlen (Kapitel 8.3.1.3) wird dieser Ansatz weiter verdeutlicht.

Im Gegensatz zur standortspezifischen Kostenbetrachtung, wird die Anlagentechnik bei der Kostenstandardisierung in ihre Produktionseinheiten zerlegt. So werden die Kosten der definierten Bereiche separat abgebildet und können in Form von Einzelmodulen in der Schredderplanung hinzugefügt oder ausgeklammert werden.

Die Standardisierung der modulgezogenen Energiekosten erfolgt über die Auswertung der zählererfassten Stromverbräuche. In Anwendungsfällen, in denen die Erfassung der Verbraucher nicht im Einzelnen, sondern über einen Sammelzähler erfolgt, kann eine Bündelung der Haupt- Neben- und Hilfsantrieben an der Schredderanlage bewertungstechnisch hilfreich sein. Der Hauptantrieb umfasst bspw. die Mühle mitsamt der Peripherie. Am Nebenantrieb werden die Stromverbräuche der Entstaubung, Abluftnachbehandlung sowie der Sortierlinien aufgenommen. Hilfsantriebe können die Entwässerung, zusätzliche Erkennungs- und Auswertesysteme oder sonstige Verladeeinrichtungen etc. sein. Unter der Einbindung von R&I-Fließbildern, lassen sich der Energiefluss und die maschinenelementspezifischen Leistungswerte vereinfacht darstellen und auswerten.

Für eine leistungsabhängige Standardisierung der Stromkosten wird ein Verhältnis aller Einzelverbraucher oder Verbraucherguppen zu dem größten Energiekonsumenten in der Schredderanlage gebildet. Dieses Vorgehen unterstellt die Annahme, dass die vor- und nachgeschalteten Produktionseinheiten der Schredderanlage energetisch in direkter Regression mit der Antriebsleistung des Schredders stehen. Je höher die installierte Leistung am Rotor, desto höher der Materialdurchsatz. Aus der Menge des produzierten Stoffstroms lassen sich dann wiederum Volumenstrom (Abluft), Transport- und Sortierleistung der Peripherie ableiten. Der durchschnittliche bzw. standardisierte Anteil am Stromverbrauch der Schredderanlage ( $\bar{w}_x$ ), ergibt sich in Gleichung (13) aus dem Verhältnis des spezifischen Anlagenverbrauchs ( $W_x$ ), zum Stromverbrauch des größten Energiekonsumenten ( $W_{Mühle}$ ).

$$\bar{w}_x = \frac{W_x}{W_{Mühle}} * 100 \quad (13)$$

Im Rahmen einer Neuplanung der Anlage ist zu berücksichtigen, dass die Basiswerte für die energetische Anteilsberechnung aus Verfahrensabläufen generiert sind, die heute nur noch teilweise dem Stand der Technik entsprechen. Eine Anpassung der Referenzwerte ist bei der Auslegung einer modernen Abluftnachbehandlung daher u.U. notwendig. Idealerweise müssten bereits heute die Lastgänge der einzelnen Produktionseinheiten während des Anlagenbetriebes separat aufgenommen werden. So ließen sich die Lastaufnahmen über die Zeit miteinander verknüpfen und ein entsprechendes Abhängigkeitsverhältnis überprüfen.

Dem Umstand geschuldet, dass der Schredder nicht ständig 100 % seiner installierten Leistung ( $P_{M\ddot{u}hle}$ ) abrufen, wird nach Gleichung (14) ein Verbrauchsfaktor ( $\beta$ ) berechnet, der in Folge der Kalkulation des standardisierten spezifischen Stromverbrauchs, in Gleichung (15) einzusetzen ist.

$$\beta = \frac{W_{M\ddot{u}hle}}{P_{M\ddot{u}hle}} \quad (14)$$

$$\bar{W}_x = \frac{P_{M\ddot{u}hle} \cdot \bar{w}_x \cdot \beta}{P_{M\ddot{u}hle}} \quad (15)$$

Demnach ergibt sich der standardisierte spezifische Stromverbrauch ( $\bar{W}_x$ ) aus dem Produkt der installierten Leistung am Schredder, dem anteiligen Stromverbrauch der Produktionseinheit sowie dem Verbrauchsfaktor geteilt durch die installierte Leistung am Schredder. Die normierten leistungsabhängigen Energiekosten ( $\bar{K}_E$ ) lassen sich dann für die einzelnen Verbraucher und Module aus dem Produkt der Verbrauchswerte und den standortspezifischen Stromkosten ( $K_{Str}$ ) ermitteln (Gleichung (16)).

$$\bar{K}_E = \sum \bar{W}_x \cdot K_{Str} \quad (16)$$

Abbildung 39 verdeutlicht beispielhaft, wie die prozentuale Energieverteilung der Einzelverbraucher im Verhältnis zum Antriebsstrang eines Bestandsschredders aussehen kann.

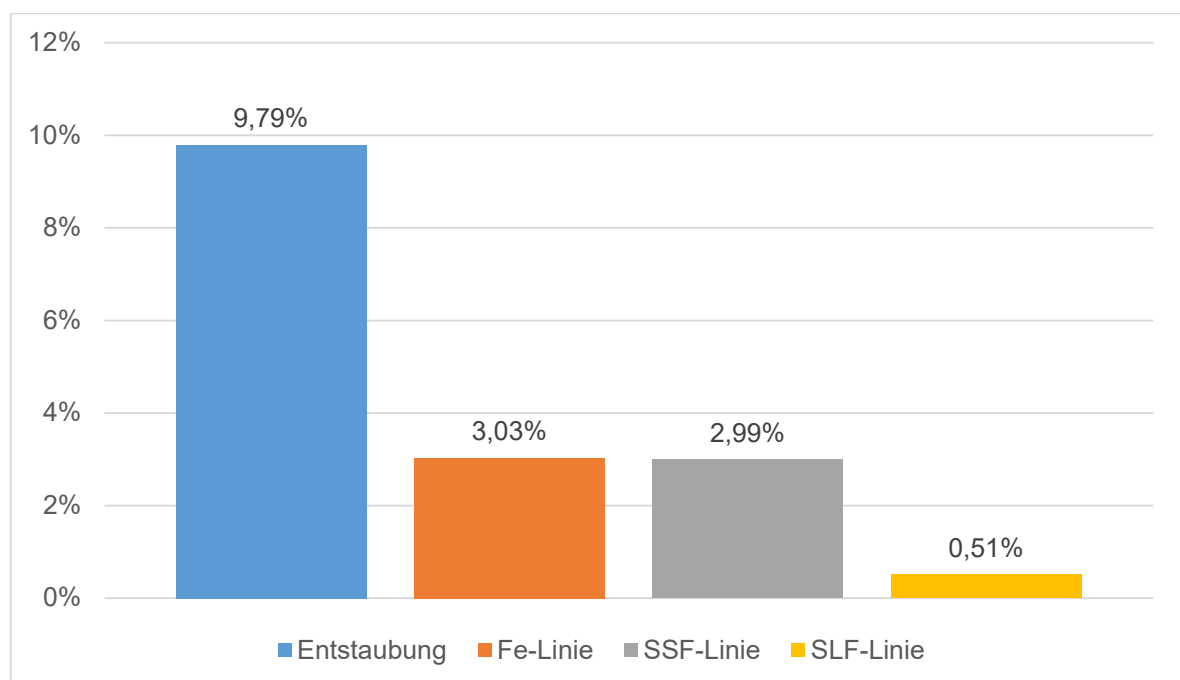


Abbildung 39: Prozentualer Stromverbrauch Nebenantriebe im Verhältnis zum Schredder

Neben der Mühle, fällt der Entstaubung der höchste Energieverbrauch zu (9,79 %). Die Berechnung des Verbrauchsfaktors ergibt für die betrachtete Anlage einen Wert von 0,71. Tabelle 16 zeigt die gemittelten Energieverbräuche pro Produktionsstunde in Abhängigkeit zur Nennleistung der Mühle inklusive der daraus resultierenden Energiekosten je Verbraucher. In Summe verbrauchen die Funktionsgruppen der Anlagentechnik in einer Produktionsstunde 0,824 kWh in Abhängigkeit zur installierten Leistung der Mühle. Dieser Verbrauch verursacht Kosten in Höhe von 0,116 €/kW.

Für einen modernen Schredder dürften die Nebenantriebe gerade auf Grund der zukünftig erforderlichen Wertschöpfungstiefe und Dimensionierung der Abgasreinigungstechnik prozentual stärker in die Gewichtung fallen.

**Tabelle 16: Energieverbrauch und -kosten pro Produktionsstunde in Abhängigkeit der installierten Leistung der Mühle**

Produktionseinheit	$\bar{W}_x$ [kWh/kW]	$\bar{K}_E$ [€/kW]
Mühle	0,71	0,101
Entstaubung	0,069	0,009
Fe-Linie	0,021	0,003
SSF-Linie	0,021	0,003
SLF-Linie	0,003	0,000
Summe	<b>0,824</b>	<b>0,116</b>

Die Standardisierung der Umschlags- und Infrastrukturkosten erfolgt auf Basis der Einzelkostenbetrachtung in dem Kapitel 8.3.1.1 als Summenfunktion. So setzen sich die genormten variablen Kosten eines Umschlaggerätes in Abhängigkeit der Schredderproduktionsmenge ( $\bar{K}_{var,Um/Pr}$ ) bspw. aus dem Produkt der standardisierten variablen Kosten des Umschlaggerätes, mit der Summe der Umschlagsfaktoren der Gerätegruppe zusammen. Der berechnete Wert wird mit dem durchschnittlichen Tagesdurchsatz der Schredderanlage ( $\mu$ ) ins Verhältnis gesetzt. Siehe hierzu folgende Gleichung (17).

$$\bar{K}_{var,Um/Pr} = \frac{\bar{K}_{var,Um} * \sum a_{Um}}{\mu} \quad (17)$$

$$\bar{K}_{fix,Um} = \sum \frac{K_{Afa} + K_Z + K_{Sonst}}{d_{Pr}} \quad (18)$$



Die fixen standardisierten Kosten pro Umschlaggerät ( $\bar{K}_{fix,Um}$ ) werden nach Gleichung (18) aus der Summe der ermittelten Einzelwerte im Verhältnis zur genehmigten Produktionszeit der Schredderanlage, auf Jahresbasis berechnet.

Die Auslegung der standardisierten Infrastrukturkosten und Werte für die Handelsbeteiligung erfolgt gemäß den Gleichungen (19) und (20) als Mittelwerte der Prozesskostenbetrachtung aus Kapitel 8.3.1.1.

$$\bar{K}_{fix,Infr} = \frac{K_{fix,Infr}}{A_{Sch}} \quad (19)$$

$$\bar{K}_{var,Han} = \frac{K_{fix,Han}}{\mu} \quad (20)$$

Die standardisierten fixen Infrastrukturkosten ( $\bar{K}_{fix,Infr}$ ) ergeben sich aus dem Quotienten der ermittelten Infrastrukturkosten pro Produktionstag zu der relevanten Nutzfläche der Schredderanlage ( $A_{Sch}$ ).

Die Kosten der Handelsbeteiligung ( $\bar{K}_{var,Han}$ ) werden nach Gleichung (20) standardisiert. Im Gegensatz zur Berechnung der standortspezifischen Handelskosten, werden diese nun als variable Kosten betrachtet, da sie direkt von der produzierten Menge abhängen.

Eine Festlegung von Standardwerten für die Geschäftsumlage sind im zukunftsorientierten Simulationstool nicht zwingend erforderlich, da sich der Planungshorizont auf die verfahrenstechnische Auslegung des Schredderprozesses beschränkt. Die Einbindung übergeordneter Managementkosten würde auf Grund unterschiedlichster Strategieszenerarien in der Bewirtschaftung des Schredders, einen zu großen Fehler in der Zahlenstruktur erzeugen [41].

Der Erfolg der prozessorientierten Vollkostenrechnung an Schredderanlagen liegt neben der zielgerichteten Aufschlüsselung der Kostenstellen, in der Betrachtung dieser auf der Produktebene. Dabei ist nicht nur entscheidend, dass das veräußerte Produkt kalkulatorisch den durchschnittlichen Deckungsbeitrag der Unternehmung erbringt, sondern, dass im Rahmen der korrekten Vollkostenkalkulation, die Identifikation von Werterzeugern und -vernichtern (Kapitel 9.2.1) erfolgt. Stimmt darüber hinaus die Struktur der Prozesskostenkalkulation am Schredder nicht mit der Struktur der Gewinn- und Verlustrechnung überein, liegt ein kalkulatorischer Fehler im Kostenrechnungssystem vor. Das bedeutet für die Kostenrechnung am Schredder konsequenter Weise, dass eine monetäre Betrachtung des

Schredderprozesses nur unter der Einbindung des behandelten Stoffstroms, sprich der Einkaufs- und Verkaufsmengen, erfolgen kann. Aus diesem Grund wird das entwickelte tagesbasierte Produktionscontrolling in Folge der Prozesskostenstandardisierung mit den nicht-monetären Kennzahlen des Kapitels 8.3.1.3 verknüpft und auf die Warenwirtschaft (Ein- und Verkauf), umgelegt [62].

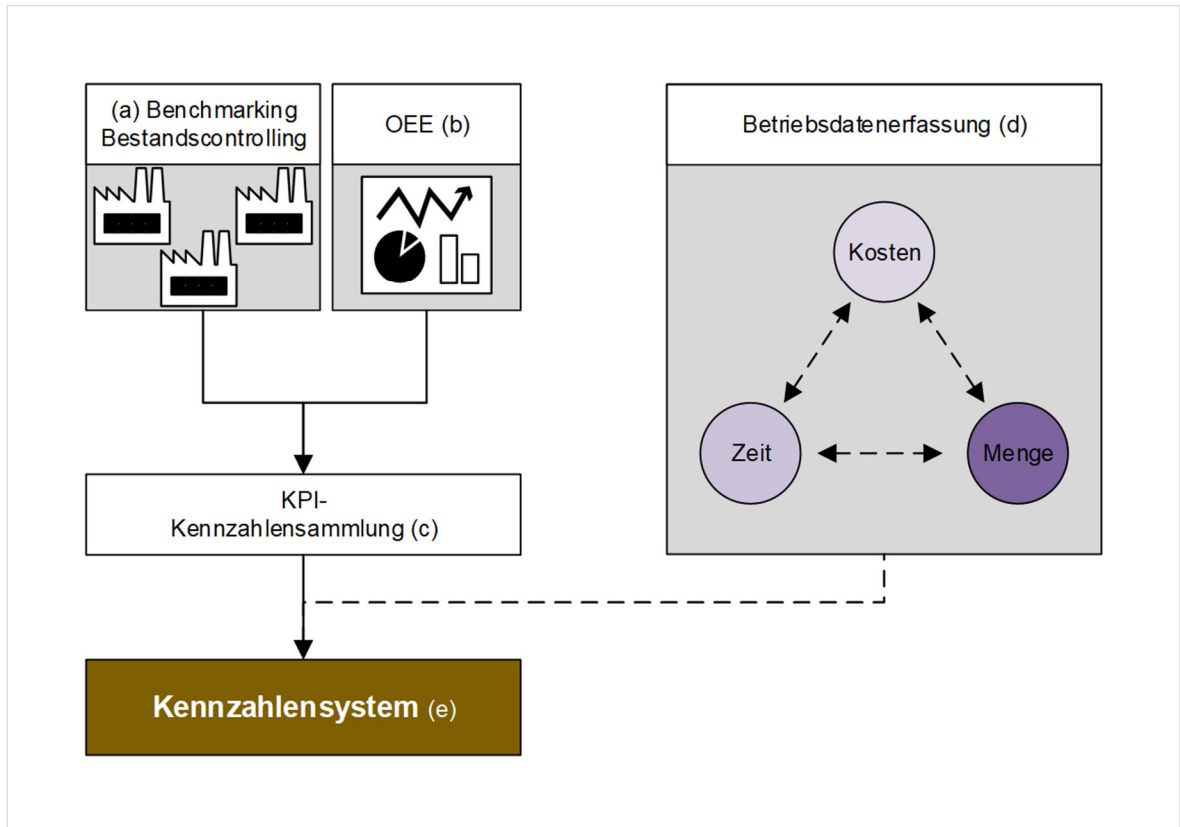
### **8.3.1.3 Nicht-monetäre Zielgrößen im Schredderprozess**

Aus den Einschränkungen im Flexibilisierungsprozess massenleistungsfähiger Aggregate, entsteht der Bedarf an produktionsspezifischen Bewertungsgrößen im Controlling. Ansätze hierzu werden in den Einführungskapiteln 4.3.2 (OEE) und 4.3.3 unter Tabelle 2 zu den wesentlichen Betriebsdaten an Schredderanlagen geliefert.

Die Flexibilität im Schredderprozess äußert sich heute primär in der Produktdiversifikation der SSF. Die Beherrschung verschiedener Produktvarianten im SSF-Downstream ist dabei eher eine kontinuierliche Anforderung an den Prozess und technisch i.d.R. durchführbar. Kurzfristige, unkalkulierbare Änderungen wie Entsorgungsengpässe der SLF oder novellierte Einfuhrbestimmungen für Produktmixe im Ausland, fordern eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit sowohl in der Produktion als auch in der Organisation. Die Kenntnis über frei verfügbare Kapazitäten im Schredderprozess unterstützt an dieser Stelle bei der Prozessoptimierung und -flexibilisierung [41]. Der rudimentäre Ansatz der Bestandsgrößenminimierung zur Reduzierung von Fixkosten im Prozess ist dabei allein nicht zielführend [35]. Die technische, umweltrechtliche und absatz- bzw. erzeugnisgesteuerte Standardisierung des Produktionsprozesses, Schicht- und Arbeitszeitmodelle sowie Bypasslösungen in der Klassier- und Sortierstrecke der SSF und SLF, können Ansätze liefern, die Flexibilität des Schredderprozesses zu gestalten.

### **8.3.2 Schreddertool für die Produktionsüberwachung**

Aus der Verbindung von Prozesskosten und der OEE lassen sich für das Schreddercontrollingtool aussagekräftige KPIs definieren (siehe rückwirkend Kapitel 4.3). Abbildung 40 veranschaulicht in Anlehnung an Abbildung 37 die angewandte Methodik zu der Erarbeitung des stoffstrombasierten Kennzahlensystems.



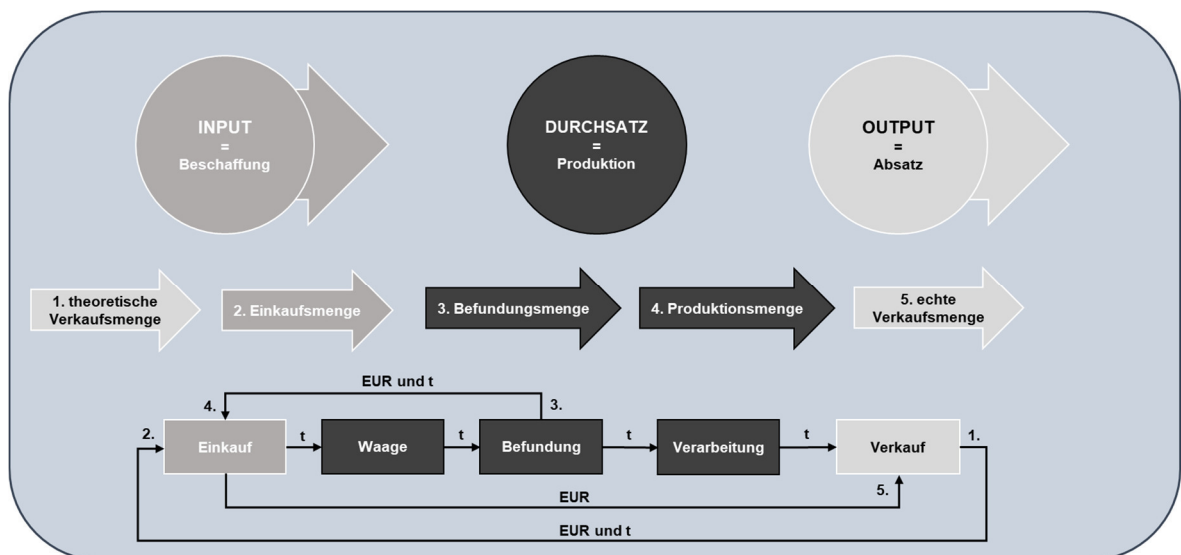
**Abbildung 40: Entwicklung eines Kennzahlensystems für Schredderanlagen**

Vor der Definition einheitlicher KPIs für Großschredderanlagen steht ein gruppenweites Benchmarking (a) zur Ermittlung der verfügbaren Kennzahlenbandbreite im Unternehmen. Bereits im Umlauf befindliche und etablierte Controllingwerkzeuge an Schreddern werden standortübergreifend bewertet und in einer geeigneten Kennzahlensammlung (c) zusammengetragen. Die effektive Verknüpfung der agglomerierten Kennzahlen mit der OEE (b) wird über die vorhandenen Betriebs- und Maschinendaten (d) gesteuert. Die ressourcengestützten Daten der Produktions- und Warenwirtschaft aus Kosten, Zeit und Menge, geben die Güte und den Umfang der Auswerteooptionen im nachgeschalteten Kennzahlensystem (e) vor. Effektiv kann nur erfasst und ausgewertet werden, was im Rahmen des Schredderprozesses als Information generiert wird. Dabei bestimmt die Qualität der Datenquelle die Aussagekraft der KPIs maßgeblich.

Die standardisierte Zusammenstellung der KPIs in einem Kennzahlensystem verfolgt das Ziel der standortübergreifenden Vergleichbarkeit. In Folge der Kombination aus Prozesskosten, der OEE und der Warenwirtschaft, lässt sich die Rentabilität der einzelnen Schredderanlagen zueinander transparent abbilden. Neben der Standardisierung der Informationsform und -dichte, besteht eine wesentliche Herausforderung in der effektiven Nutzung des Tools im Tagesbetrieb. Das Controllingtool lebt von der Schaffung eines einheitlichen

Datenerhebungsprozesses, welcher durch einen vergleichbaren Sortenkatalog bestimmt und in Form einer einheitlichen Buchungslogik sowie regelmäßig durchgeführten Lagerbestandsbewertungen (LBB), in den Schredderstandorten praktiziert wird.

Die Betrachtung des Annahme- und Abwicklungsprozesses am Schredder aus dem Blickfeld der Administration, verdeutlicht die Notwendigkeit von standardisierten Betriebsabläufen bereits vor dem eigentlichen Verarbeitungsprozess, als Grundlage der systemübergreifenden Vergleichbarkeit. Unter Zuhilfenahme der Prozesskette in Abbildung 41 und den gelieferten Informationen aus Kapitel 3.1 (speziell Abbildung 1), lassen sich die betrieblichen Anforderungen zur erfolgreichen Verwendung des Schreddertools für die tägliche Betriebsdatenauswertung veranschaulichen.



**Abbildung 41: Administrative Steuerung des Abwicklungsprozesses an Schreddern**

Am Beginn der Wertschöpfungskette des Schredders steht die geplante Verkaufsmenge ( $t$ ) mit angenommen oder bereits verhandelten Verkaufspreisen (EUR). Auf Grundlage der geplanten Verkaufsmengen werden in einem vorgegebenen Sortenmix Einkäufe getätigt. Die Einkaufsverträge fungieren dabei als Qualitäts- bzw. Mengengerüst für die Deckung des Verkaufsgeschäftes.

Nach Eingang (Verwiegung) des Materials, findet eine Befundung unabhängig von der Information aus dem Kontrakt statt. Dies ist ein entscheidender Prozessschritt, damit die Befundung nicht davon abhängt, welche Materialien ursprünglich vom Händler eingekauft worden sind. Die Separierung von Handel und Befundung stellt für den stoffstromtransparenten Produktionsablauf eine wesentliche Anforderung dar.

Nach der Befundung findet von Seiten der Administration ein Abgleich des vorhandenen Materials und dem bestehenden Einkaufsvertrag statt. Falls der Befund nicht dem Kontrakt

entspricht, ist es jederzeit durch eine kaufmännische Entscheidung möglich, das Material neu zu vergüten. Der Befund und der darauf basierende Bestand der einzelnen Sorten bleibt dabei unberührt.

Der gebuchte Nettowert entspricht damit der effektiven Inputmenge am Schredder und ist für die Prozesskostenrechnung entsprechend transparent. Der Schredderoutput und die daraus abgeleiteten Verkaufsmengen können im Zuge dessen neue eingepreist und in der Wirtschaftlichkeitsrechnung der Anlage direkt berücksichtigt werden.

Grundsätzlich bildet der Tagesinput im Verhältnis zur Gesamtliefermenge nur einen kleinen Teil des erzeugten Outputs ab. Der Beitrag zur Wertschöpfungskette an einem Schredder mit hoher Durchsatzleistung, lässt sich bei geringen Losgrößen im Input, ohne die direkte Rückkopplung der Stoffstromverteilung und Wertschöpfungstiefe im Output, nicht direkt bewerten. Zum Zeitpunkt der Buchung ist die Wertsteigerung oder -minderung lediglich kaufmännisch erfasst. Erst die LBB am Ende einer Produktionsperiode belegt, ob der Schredder ertragssteigernd betrieben wurde (ex post Betrachtung). Wobei hier ganz klar zwischen Bewertungsansätzen zu unterscheiden ist, die durch den Vertrieb bzw. Verkauf gesteuert sind, den Schredderprozess also über Fixkosten abbilden und mit der Differenz in den Markt gehen und solchen, die den Einkauf über die Prozesskosten steuern und damit eine kostenbasierte aber flexible Einkaufssteuerung betreiben. Letzterer Ansatz verfolgt eine direkte stoffliche und kaufmännische Bewertung der Inputmenge zum erzeugten Output und eine Aufschlüsselung der im Zuge der Verarbeitung anfallenden echtzeitgebundenen Prozesskosten. Die Notwendigkeit einer gewichteten Stoffstromtransparenz im Schredderprozess wird damit umso deutlicher und fordert entsprechend aussagekräftige KPIs.

Die Produktionskosten pro Produktions- und Betriebsstunde ( $K_{\text{€/h Pr}}$ ,  $K_{\text{€/h Betr}}$ ) berechnen sich über die Gleichungen (21) und (22).

$$K_{\text{€/h Pr}} = \frac{t_{Pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}}{t_{Pr}} \quad (21)$$

$$K_{\text{€/h Betr}} = \frac{t_{Pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}}{t_{Betr}} \quad (22)$$

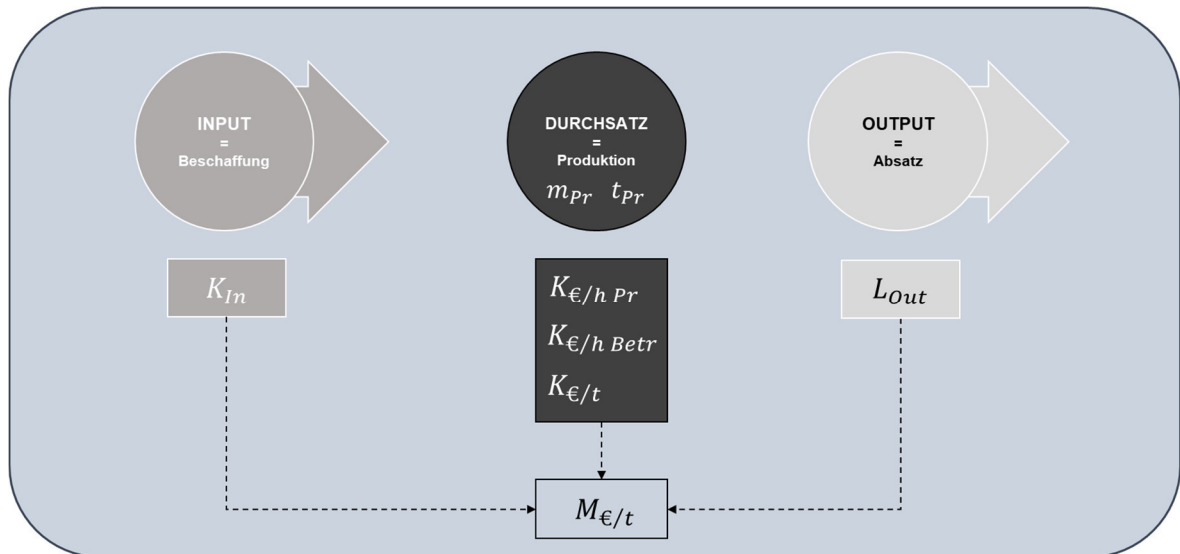
Die täglich erfassten Produktionskosten pro Produktionsstunde ( $K_{\text{€/h Pr}}$ ) ergeben sich aus dem Produkt der Produktionsstunden und den variablen Gesamtkosten am betrachteten Tag, zuzüglich der fixen Gesamtkosten. Die berechneten Werte werden mit den effektiven Produktionsstunden des Schredders ins Verhältnis gesetzt. Als Produktionszeit wird der

Zeitraum betrachtet, in dem der Durchsatz der Schredderanlage größer Null ist. Die Produktionskosten pro Betriebsstunde ( $K_{\epsilon/h\text{ Betr}}$ ) ergeben sich analog dazu, wobei sich die Betriebsstunden aus der Summe der Produktions- sowie Stillstandzeiten des betrachteten Arbeitstages ( $t_{\text{Betr}}$ ) zusammensetzen.

Ein weiterer aussagekräftiger KPI wird analog der vorangestellten Gleichung (22) aus dem Quotienten der Produktionskosten und dazugehörigen Produktionsmengen ( $m_{pr}$ ) gebildet (siehe Gleichung (23) im Formelverzeichnis). Zweck der in Gleichung (21), (22) und (23) definierten KPIs ist die Kontrolle der Produktionskosten. Bezugsobjekt ist alleinig der Produktionsprozess und das daraus entsprungene Kostengefüge. Um der stoffstromspezifischen Gewichtung der Prozesskosten gerecht zu werden, wird mittels Gleichung (24) die preisliche Bewertung der In- und Outputströme eingebunden.

$$M_{\epsilon/t} = \frac{L_{Out} - (K_{In} + (t_{Pr} * K_{var,Ges} + K_{fix,Ges}))}{m_{pr}} \quad (24)$$

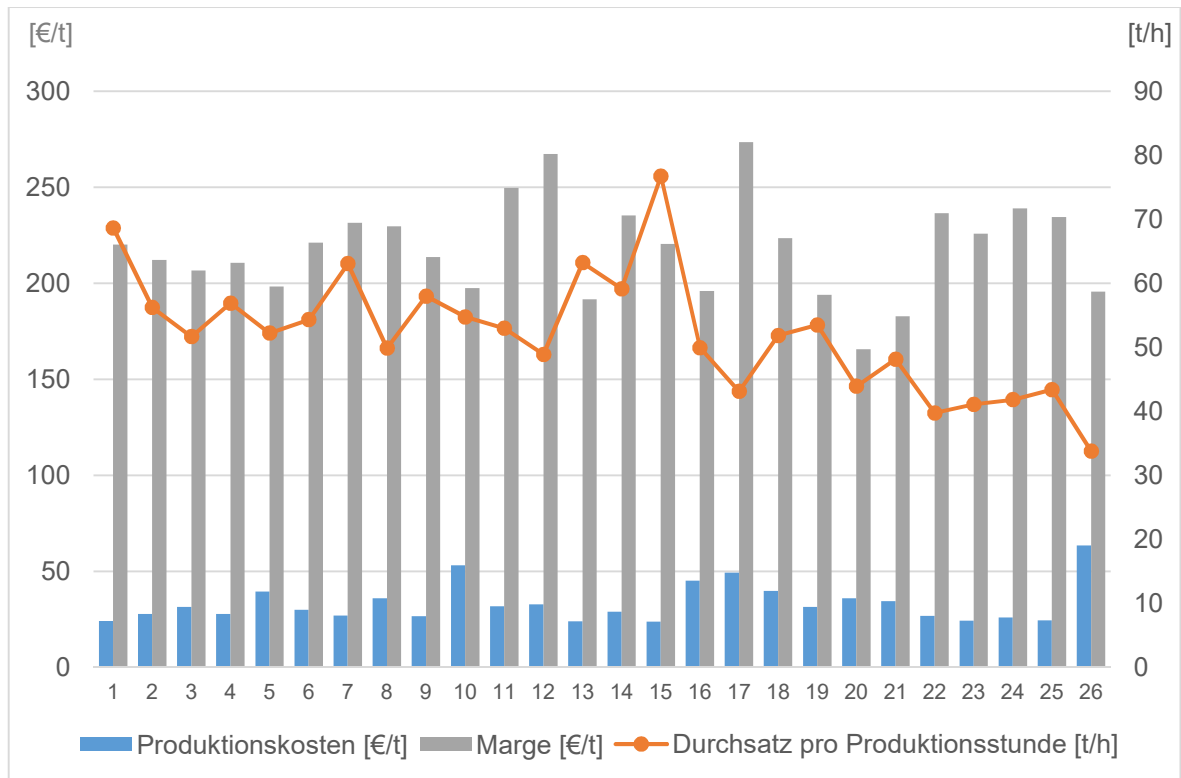
Die Marge, negativ wie positiv ( $M_{\epsilon/t}$ ) an der Schredderanlage ergibt sich aus dem Quotienten der wertstrombasierten Ertragsrechnung und ihrer spezifischen Produktionsmenge. Die Einkaufskosten ( $K_{In}$ ) sind das Produkt aus Einkaufspreis und Tonne des erworbenen Inputmaterials. Die produzierte Leistung ( $L_{Out}$ ) kalkuliert sich aus der Summe des Outputs, als durchschnittspreisbewerteter Sortenmix anteilig aus dem Schredderschrott, der SSF und der SLF. Inputsortenabhängige Kosteneffekte, wie ein erhöhter Verschleiß oder Energieverbrauch in der Anlage, können über einen zusätzlichen Schlüssel eingepreist werden. Darüber hinaus ist die Verwendung von Durchschnittspreisen dann nicht erforderlich, wenn eine separat nachweisgeführte Verarbeitung des Inputs und die Bewertung der daraus resultierenden Outputmengen auf Stundenbasis erfolgt. Kapitel 9.2.4 dieser Arbeit liefert dazu einen operativen Lösungsansatz. Abbildung 42 fasst die angewandten monetären Kennzahlen des Schreddertools in einer Übersicht zusammen.



**Abbildung 42: Übersicht der wesentlichen monetären Kennzahlen des Schreddertools**

In der folgenden Abbildung 43 findet sich ein beispielhafter Auszug aus dem Schreddertool unter Verwendung einer standortspezifischen Kostenstruktur und Durchschnittspreisen auf Tagesbasis. Mit Hilfe solcher Ertragsrechnungen als Teil der Produktionstagesberichtstruktur, lassen sich Erkenntnisse über die Wirtschaftlichkeit der Schredderanlage erlangen. Die Daten sind im Sinne des TSR-Sperrvermerks in der Gewinnmarge hochskaliert. Für die dargestellten Kennzahlen lässt sich lediglich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Produktionsmengen und -kosten ableiten. Aus einer sinkenden Durchsatzleistung ergeben sich höhere Produktionskosten.

Grundsätzlich sollte auch ein relativer Zusammenhang zwischen den Produktionskosten und der Gewinnmarge bestehen. Am 17. Produktionstag der Grafik jedoch, ergibt sich trotz der vergleichsweise hohen Produktionskosten eine Marge von 270 €/t. Dieser Effekt ist entweder auf die LBB (Verschiebung in der Durchschnittspreisbewertung) zurückzuführen oder es wurde Material geschreddert, das mit einem sehr hohen Verkaufserlös in den Büchern steht (bspw. Elektromotoren oder eine Umarbeitung der SSF).



**Abbildung 43: Grafische Darstellung der Gewinnmarge in Abhängigkeit der Produktionsmengen und -kosten am Schredder**

In Anlehnung an die Ausführungen in Kapitel 8.3.1.3, stellen die Gleichungen (25) und (26) den jeweiligen zur Berechnung der OEE herangezogenen Verfügbarkeits- und Leistungsfaktor dar.

$$\tau = \frac{t_{Pr}}{t_{Sch}} * 100 \quad (25)$$

$$\delta = \frac{\mu}{\mu_{max}} * 100 \quad (26)$$

Der Verfügbarkeitsfaktor ( $\tau$ ) bildet sich aus dem Verhältnis der Produktionsstunden zur Schichtzeit des betrachteten Tages multipliziert mit dem Faktor 100. Die Schichtzeit ( $t_{Sch}$ ) ist der für die Produktion vorausgeplante Zeitraum. Geplante Stillstände werden in die Schichtzeit nicht mit eingebunden.

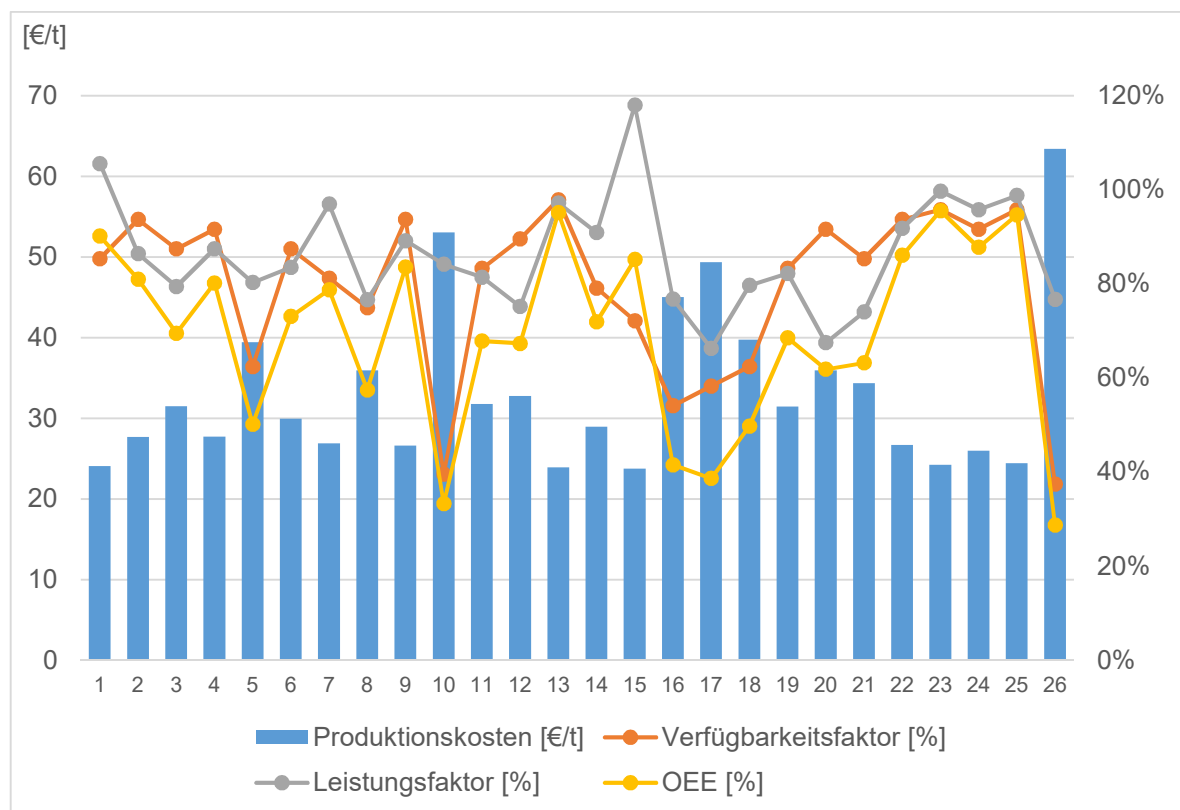
Aus dem Quotienten des effektiven Durchsatzes und der maximalen Anlagenauslastung unter normalen Betriebsbedingungen pro Stunde ( $\mu_{max}$ ) multipliziert mit 100, generiert sich der Leistungsfaktor ( $\delta$ ). Das Produkt der beiden Faktoren ergibt die OEE einer Schredderanlage (Gleichung (27)).



$$OEE = \tau * \delta \quad (27)$$

Die Einbindung eines zusätzlichen Qualitätsfaktors ist in der Gleichung (27) dann sinnvoll, wenn eine Ausschussbewertung im Outputstrom stattfindet, sprich Minderqualitäten erzeugt und aus dem Aufbereitungsprozess ausgeschleust und quantifiziert werden [47]. Ein einfacher Ansatz für die Qualitätsbewertung an Schredderanlagen ist in diesem Zusammenhang die erzeugte Menge der SLF. Setzt man einen Grenz- bzw. Referenzwert für diese Fraktion ein, kann eine Überschreitung für die OEE fakturiert werden. Eine Übertragung dieses Ansatzes auf andere Fraktionen und die Einbindung des Qualitätsfaktors als wesentlichen Bestandteil der OEE-Gesamtgleichung, wird im nachfolgenden Kapitel 9.2.4 unter der Verwendung metallurgischer Auswertungen weiter diskutiert.

Für ein besseres Verständnis der Einsatzmöglichkeiten nicht-monetärer Kennzahlen im Schredderreporting, findet sich in Abbildung 44 ein zu Abbildung 43 ergänzender Auszug aus dem Schreddertool.



**Abbildung 44: Grafische Darstellung der Produktionskosten im Verhältnis zur OEE des Schredders**

In Abbildung 44 werden die Produktionskosten in ein Verhältnis zu Leistungsmessung am Schredder gesetzt. In Folge geringer Verfügbarkeit durch bspw. außerplanmäßige Ausfälle, sinkt der Leistungsfaktor. Das angestrebte Verhältnis aus Produktionszeit und Produktionsmenge ist gestört. Die OEE fällt mit dem Ergebnis erhöhter Produktionskosten pro produzierte Tonne Gesamtoutput. Eine anteilige Produktionskostenaufschlüsselung auf Outputuntersorten ist im Produktionstool berücksichtigt.

Weitere KPIs ergeben sich aus der Quantifizierung der Materialströme am Schredder. Die bereits als Bezugsgröße eingesetzte Produktionsmenge aus den bekannten Hauptsorten, kann entsprechend der Wertschöpfungstiefe in den nachgeschalteten Klassier- und Sortierprozessen, weiter aufgeschlüsselt werden. Demnach werden spezifisch für jede Inputsorte der Schredderanlage, die erzeugten Massen an Outputsorten bestimmt.

Eine transparente Evaluation von stoffstrombasierten Massenverhältnissen bietet die Batchfahrweise (siehe auch Kapitel 4.2). Wird das Vormaterial in Form einer Monocharge aufbereitet, können vereinfacht Rückschlüsse auf den tatsächlichen Einkaufswert der Ware getätigt werden. Auf diese Weise sind Preisanpassungen im Einkauf und die Steuerung des Qualitätportfolios in den Ausgangssorten möglich. Das entwickelte Schreddertool erfasst entsprechende Mengen in einem stoffstromorientierten Zusammenhang. Schredderanlagen mit einer kapazitären Leistung größer 4.000 PS lassen sich nur bedingt monochargiert an der Leistungsgrenze betreiben. So bietet das Kennzahlensystem u.a. die Möglichkeit einen Sortenmix im Input zu erfassen, der auf Grundlage von aktuellen Verkaufspreisen, mengentechnisch als Kochrezept zusammengestellt ist.

Weiter lassen sich aus dem Mengengerüst heraus sortenspezifische Effizienzfaktoren ableiten. So können technische und organisatorische Verfügbarkeitsverluste in Form von Stillständen hinterlegt sowie Stillstandsgründe in Bezug auf ihre Auftretenswahrscheinlichkeit bewertet und sortenspezifisch zugeordnet werden. Die Stillstandszeiten werden über geplante und ungeplante Stillstände abgebildet. Geplante Stillstände werden zeitlich dokumentiert und auf Pausen, Schichtwechsel oder geplante IRW zurückgeführt [47]. Die Liste der ungeplanten Stillstände ist stark maschinen- und betriebsabhängig und kann die klassischen Störfälle, wie Verpuffungen, Schwerteile, elektrische oder hydraulische Systemausfälle, Vormaterialengpässe bei Weitem überschreiten. Sie bedarf auf Grund des besagten Umfangs, an dieser Stelle keiner weiteren Ausführung.

Die Kombination der genannten KPIs mit der OEE münden schließlich in der Darstellung aller wesentlichen Verlustgrößen am Schredder. Über die Erfassung der Stillstandszeiten lassen sich die Verfügbarkeitsverluste der Anlage abbilden. Die Durchsätze der einzelnen

Outputfraktionen dienen der Interpretation des effektiven Leistungsspektrums. Aussagen über Qualitätsverluste werden mittels der sortengebundenen Massenbilanzen getroffen. Das Schreddertool ist dadurch folglich in der Lage, die Erfolgsrechnung am Schredder mit der prozesstechnischen Effizienzbewertung, in einem Kennzahlensystem zu vereinen [49] [47].

Die erfassten Betriebsdaten und daraus generierten KPIs werden in Form eines mehrschichtigen Berichtswesens ausgewertet. Dem Schreddertool fällt folglich neben der Datengenerierung auch die Aufgabe der Datenverarbeitung zu. Das betriebliche Berichtswesen sieht seine Aufgabe in der unterjährigen Zielverfolgung und weniger in der Unterstützung des übergeordneten Managements in strategischen Steuerungs- und Planungsaufgaben [42]. Strategische Planungen sind langfristige Entscheidungsprozesse, die auf einem Zeithorizont von mehr als fünf Jahren aufbauen und durch Geschäftsplanungen in kürzeren Zeitintervallen konkretisiert werden [20].

Die Stärke des Schreddertools liegt primär in der Bereitstellung von Informationen, die der tagesbasierten Steuerung der Schredderanlage dienen. Die standardisierten Tages- und Wochenreports setzen auf der Unternehmensplanung auf und stellen in der laufenden Periode Informationen über die Zielerreichung und die diese beeinflussenden Faktoren bereit [42]. Die gesammelten Erkenntnisse sind zunächst planungsunterstützend und fördern standortspezifische Untersuchungen über die rationellste Produktionsweise. Sie tragen nur indirekt zur technische Gestaltung der zukünftigen Anlagentechnik bei [20].

In der folgenden Abbildung 45 ist ein beispielhafter Teilauszug des tagesbasierten Berichtswesens an einer Großschredderanlage dargestellt.

Dieser Tagesberichts-auszug dient der Buchhaltung u.a. für die Umbuchung im Warenwirtschaftsprogramm. Die geringen Produktionsmengen lassen auf eine geringe Verfügbarkeit des Schredders schließen. Für den besagten Tag sind jedoch keine Ausfälle verzeichnet. Der Leistungsfaktor liegt bei 63 %. Voluminöse schadstoffentfrachtete Kühlthecken führen an Schreddern mit mittlerer Antriebsleistung zu geringen Durchsatzmengen im Verhältnis zur Produktionszeit. In Verbindung mit der tagesbasierten Durchschnittspreisbewertung ergibt sich für diesen Produktionsabschnitt ein Negativertrag von (minus) 42 €/t.

INPUT				OUTPUT				
Sorte [-]	Sortennr. [-]	Menge [t]	Anteil [%]	Sorte [-]	Sortennr. [-]	Lager	Menge [t]	Anteil [%]
SVM	14051	244,457 t	67,80%	Sorte 4	14001	65	207,500 t	57,55%
Mischschrott leicht	14052	,000 t	0,00%	Fe-Langleile	13005	65	4,330 t	1,20%
Karossern ohne Motor	14053	89,573 t	24,84%	SLF grob	20203	65	38,820 t	10,77%
Karossern mit Motor	14054	,000 t	0,00%	SLF fein	20202	65	63,070 t	17,49%
Waschmaschinen/Weiße Ware	14055/14057	,000 t	0,00%	EC Absieb leicht (Feinkorn)	14008	65	2,280 t	0,63%
PKW-Motore	14059	,000 t	0,00%	EC Alu Mix (Mittelkorn)	14005	65	29,620 t	8,22%
Nagelschrott, ungesiebt	14058	,000 t	0,00%	EC Alu Mix (Überkorn)	14006	65	13,020 t	3,61%
Handelsguss unzerkl.	50503	,000 t	0,00%	EC Fe-Überbandmagnet	-		,000 t	0,00%
Sonstige	-	,000 t	0,00%	EC Schwermetalle	-		,000 t	0,00%
Kühltheken	14056	26,518 t	7,35%	EC VA Shredder	-		,000 t	0,00%
Dosen	31052	,000 t	0,00%	EC Alu Zorba	20013	68	,000 t	0,00%
Zerlege	14062	,000 t	0,00%	EC Kupfer Shredder	20006	68	,000 t	0,00%
Holzshredder	14058	,000 t	0,00%	EC Messing Shredder	20007	68	,000 t	0,00%
-	-	,000 t	0,00%	EC Alu	14012	65	,734 t	0,20%
-	-	,000 t	0,00%	EC VA Rest groß	20029	68	,000 t	0,00%
-	-	,000 t	0,00%	EC VA Rest klein	20028	68	,000 t	0,00%
-	-	,000 t	0,00%	EC Mischmetalle	-		,000 t	0,00%
-	-	,000 t	0,00%	Cu/Fe Anker	20018	65	1,174 t	0,33%
-	-	,000 t	0,00%	Holzrückstände aus Shredder	20208	65	,000 t	0,00%
-	-	,000 t	0,00%	Sonstige 2	-		,000 t	0,00%
	Σ	360,548 t	100,00%		Σ		360,548 t	100,00%

Abbildung 45: Teilauszug eines Produktionstagesberichts aus dem Schreddertool

Die Anwendung des Schreddertools über einen Zeitraum von zwölf Monaten in verschiedenen Schredderstandorten der TSR gilt dem Nachweis der Praxistauglichkeit und Evaluation von Entwicklungspotentialen. In der folgenden Liste werden die wesentlichen Erkenntnisse und Entwicklungsfelder des Benchmarkings aufgeführt:

1. Die manuelle Eingabe der Betriebs- und Maschinendaten,
2. standardisierte Kostensätze und -schlüssel,
3. die Anzahl der Systemschnittstellen und die Datenfülle (Potentialanalyse),
4. informationsgestützte Verknüpfung von Technik und Warenwirtschaft,
5. monochargierte Produktionsweise,
6. die Vergleichbarkeit in der Produktionsführung und
7. einheitliche Standards im Sortenkatalog sowie der stoffstrombasierten Buchungslogik.

Die Praxisphase zeigt, dass das Schreddertool als manuelles Eingabesystem nur bedingt eine fehlerfreie Betriebsdatenerfassung zulässt. Die Verwendung starrer Kostensätze und Kostenschlüssel führt zu geringen kalkulatorischen Abweichungen im Realbetrieb. Darüber hinaus fördern Schnittstellenüberlagerungen im Verfahrensablauf sowie Unterschiede in der Betriebsführung, die Messungenauigkeiten im Prozess. Eine automatisierte Erfassung

der Daten ist an dieser Stelle ein valider Ansatz entsprechende Sicherheit und Transparenz zu schaffen. Datenmanipulationen und der Arbeitsaufwand in der Pflege der Daten, werden entsprechend verringert. Die Einbindung von Maschinendaten aus den einzelnen Produktionseinheiten und ihren untergeordneten Maschinenelementen, kann den betriebsgestützten Schwerpunkt der Datenerhebung auf einen Technischen erweitern. Existierende Systemschnittstellen und Datenquellen müssen dafür signaltechnisch abgegriffen und aus der PLT bzw. der SPS der Anlage ausgelesen werden. So lassen sich auf Basis der installierten Verfahrenstechnik auch Aussagen über systemspezifische Emissionen und ihre Verbindung zum verarbeiteten Vormaterial treffen. Ein automatisierter Anlagenbetrieb wäre über die Rückkoppelung der gesetzten System- und Betriebsgrenzen ebenfalls möglich. Die Erfassung des gesamten Maschinendatenspektrums ist folglich die Grundvoraussetzung für eine fundamentierte technische Potentialanalyse. Die Maschinendaten bergen das echte Potential der technischen Performancesteigerung.

Ohne die informationstechnische Verbindung des Controllingtools mit der rechnergestützten Warenwirtschaft, kann keine direkte Auswertung der Vertriebskennzahlen erfolgen. Die kalkulatorische Unschärfe entsteht u.a. dadurch, dass Ein- und Verkaufspreise teilweise bereits vor der Verarbeitung des Vormaterials, festgelegt sind. Das System ist damit überwiegend reaktiv, wodurch der planerische Charakter erst in einem nachfolgenden Geschäftsabschluss oder einem Folgemonat der betrachteten Geschäftsperiode greift.

Die Verarbeitung des Stoffstroms am Schredder ist als Batch für die Transparenz der Betriebsdaten essentiell. Wertstoffpotentiale können nur dann erkannt und separat bepreist werden, wenn eine Auswertung der Fraktionen inline oder unmittelbar nach der Verarbeitung erfolgt oder die Monocharge separat vorgelagert, infolgedessen kameratechnisch evaluiert, dann verarbeitet und im Anschluss an die Produktion bewertet wird. Über diesen Ansatz soll dagegen nicht pauschalisiert werden, dass eine monochargierte Verarbeitung des Inputs aus betriebswirtschaftlicher Sicht stets sinnvoll ist. Das Tool bedarf demnach einem einheitlichen Standard in Form eines Qualitäts- und Bewertungsrahmens in der Produktionsführung, wobei der Erfolg dieses Ansatzes maßgeblich in der Bereitschaft der Abnehmer liegt, den verlängerten Weg dieser stoffstrom- und ausbringungsorientierten Verarbeitung mitzugehen (siehe Kapitel 11.4).

Das Schreddertool ist nur so stark, wie seine Vergleichbarkeit in der Gruppe. Die Forderung nach einheitlichen Sortenkatalogen und standardisierten Buchungsvorgängen, wird durch den Gruppenbenchmark gestützt. Das System muss so aufgesetzt sein, dass schlussendlich keine kaufmännische Entscheidung mehr am Prozess vorbeigeführt werden kann. Das Schreddertool ist demzufolge lediglich die Vorentwicklungsstufe einer automatisierten und systemübergreifenden Datenerfassung am Schredder der Zukunft.

### 8.3.3 Simulationstool für die Anlagenplanung

Für die strategische Investitionsentscheidung im Kontext dieser Dissertation jedoch wird ein Verfahren benötigt, das eine wesentliche Betreuungsrolle im Planungsprozess einnimmt. Die Strategieentscheidung über den Wechsel von der Bestandstechnik zu neuen Schreddertechnologien und Innovationen (Säule 5), kann nur über eine übergeordnete Informationsversorgungsfunktion geführt werden [42]. Das beschriebene und etablierte Schreddertool übernimmt im Zuge dieses Modellansatzes die vorgelagerte Rolle der Datenbeschaffung und -aufbereitung. Die laufenden Aufzeichnungen der Produktionszahlen werden in Form von Rohdaten extrahiert und für das nachgeschaltete Simulations- bzw. Planungstool aufbereitet (siehe auch Abbildung 37). Der Risikominimierung halber hat die Aufzeichnung der Rohdaten über einen statistisch signifikanten Zeitraum und so zu erfolgen, dass sie für den Modellansatz qualitativ verwertbar sind. Aus der langfristigen Strategieplanung heraus, ist die Einbindung von zukunftsgerichteten Plankennzahlen im Schreddertool deshalb heute bereits sinnvoll. Wesentliche Ansätze wurden hierzu in Kapitel 8.3.1.2 unter der Prozesskostenstandardisierung und der modularen Gestaltung der Schredderanlage geliefert. Für das Simulationstool relevante, aber nicht aus dem Schredderprozess generierbaren Daten, sind soweit erforderlich und realisierbar, neu zu erheben [48].

Das Simulationstool für die Planung einer Schredderanlage unter dem Einfluss emissions-technischer Bedingungen ist damit im Wesentlichen kostenbasiert. Der geplante Durchsatz und das Produktportfolio stellen die Anforderungen an das Leistungsspektrum der Schredderanlage. Das Leistungsspektrum wiederum gibt die Investitionstiefe in den Einzelmodulen vor. Unter Einbindung der kalkulatorischen AfA-Zeiträume, Zinsanteile und modulspezifischen IRW-Kosten, lassen sich die Ausgangswerte für die Betriebskostenkalkulation bilden. Die Eckdaten der Betriebsführung werden in Form von geplanten Produktionstagen, Schicht- und Zeitmodellen, dem Personalbedarf, Produktionsbeihilfen, dem Platzbedarf und Verfügbarkeitsverlusten separat festgelegt. Aus der Summe der eingegebenen Werte lassen sich automatisch die Prozesskosten der geplanten Schredderanlage berechnen und das Risiko einer Investition bewerten.

Durch die Verwendung eines Simulationswerkzeuges wird der klassische Ansatz der ressourcenlastigen Investitionsplanung von der Situationsanalyse, über die Definition des Investitionsziels (technisch, wirtschaftlich und sozial), bis zur Umsetzung und Ergebnisbewertung umgangen [39]. Die Simulation verbindet alle Phasen der Investitionsplanung, Entscheidungsfindung und Umsetzung in einer modellierten Studie und trägt wesentlich zur

Risikominderung und Fehlervermeidung bei. Die phasenweise Verifikation und Validierung der errechneten Planergebnisse mit den KPIs des tagesbasierten Schreddercontrollings helfen eine entsprechend hohe Qualität in die Investitionsentscheidung zu bringen [48]. Die Referenzergebnisse des Simulationstools werden im Zuge der Innovationsplanung in Kapitel 9.3 dargestellt.

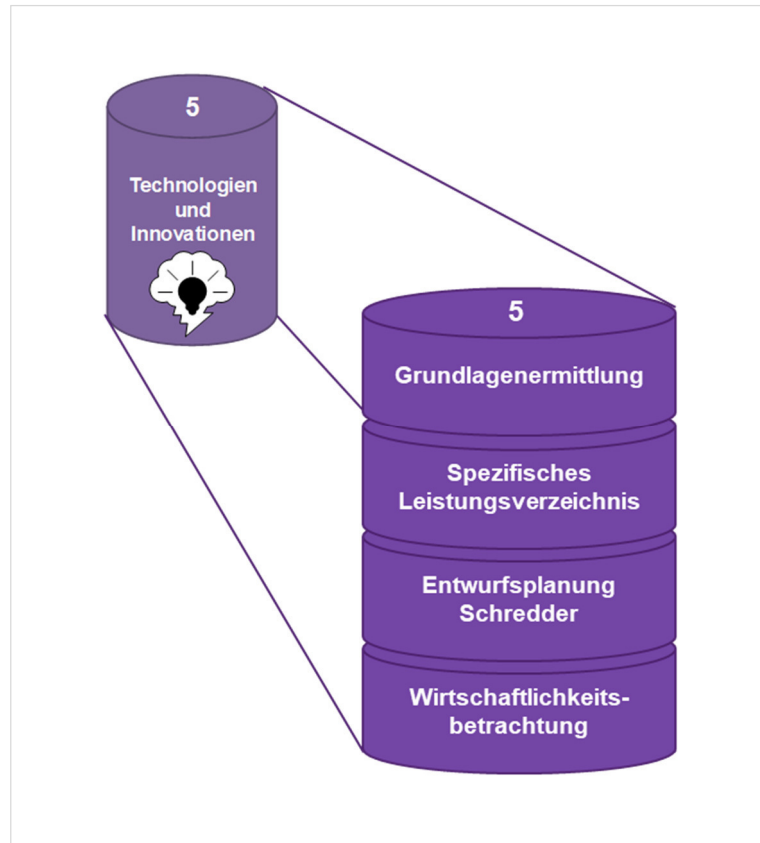
## **9 Weiterentwicklung von Schredderanlagen**

Gegenstand der in dieser Dissertation geführten Untersuchung ist im Folgenden die Erstellung einer Konzeptstudie über die Planung und perspektivische Umsetzung einer Schredderanlage für Konsumgüterschrott, Altfahrzeuge und Komplexschrotte unter den in Kapitel 8.2 herausgearbeiteten Rahmenbedingungen. Die Ergebnisse dieser Studie werden der Unternehmensgeheimhaltung wegen in kompakter bzw. gekürzter Form dargestellt und im Einzelfall mit zukunftsweisenden Kerntechnologien verknüpft. Dem Leser wird so die Möglichkeit gegeben, sich in die einzelnen Sachverhalte literarisch zu vertiefen, die im Gesamtkontext der hier geführten Ergebnisdarlegung den Rahmen der Arbeit sprengen würden.

### **9.1 Säule 5: Technologien und Innovationen**

Ziel der durchgeführten Konzeptstudie ist die Erfüllung des vorausgeschalteten technischen und organisatorischen Anforderungsprofils aus Kapitel 8.2. Alle technischen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen in Deutschland, insbesondere nach den Vorgaben des BREF und des TA Luft-Entwurfes, unter Berücksichtigung der ganzheitlichen, verfahrenstechnischen und marktspezifischen Parameter, werden der Studie damit zu Grunde gelegt.





**Abbildung 46: Säule 5: wesentliche Systembausteine in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen**

Der Aufbau der strategischen Konzeptstudie gliedert sich gemäß Säule 5 (Abbildung 46) in vier Leistungsphasen:

1. die Grundlagenermittlung,
2. die Vorplanung bzw. das Leistungsverzeichnis,
3. die Entwurfsplanung und
4. die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Die Grundlagenermittlung ist Teil der in den Kapiteln 6 bis 8 durchgeführten allgemeinen Analysen, besitzt aber auf Grund ihrer Praxisrelevanz für die TSR auch eine standortspezifische Komponente. So umfasst die übergeordnete Systemkonzeptionierung in dieser ersten Leistungsphase auch Untersuchungsfelder, die die Ist-Situation von einzelnen Schredderstandorten in Form der individuellen Genehmigungslage, dem Stand der Technik, der Produktivität, der strategischen Lage sowie der Marktpartizipation abgleichen. Die Ergebnisse aus diesem Benchmark definieren den Umfang der zweiten Leistungsphase aus Vorplanung bzw. dem Leistungsverzeichnis.

Die Vorplanung umfasst die Anlagenparameter und die Systemkonfiguration des Schredders. Durch die Abstimmung der Zielstellung (Mengendimensionierung, Verarbeitungstiefe, emissionstechnische Grenzwerte etc.) und unter Berücksichtigung der Stahlwerksanforderungen sowie der standortgebundenen Beschaffungsstrukturen, lassen sich die Ausgangsparameter der Entwurfsplanung festlegen. Die Erarbeitung eines Prozessablaufs einschließlich der Untersuchung alternativer verfahrenstechnischer Lösungsmöglichkeiten in Form einer Marktanalyse (Referenzanlagen, Portfolioanalyse bei Anlagenherstellern), die zeichnerische Darstellung (Ablaufpläne, Stoffstromdiagramme) und Dimensionierung der Haupt- und Nebenaggregate, stellen die Kernaufgaben der zweiten Leistungsphase dar. Auf Grundlage der erarbeiteten modularen Anlagenplanung erfolgt die Entwurfsplanung, in welcher die Konzeptvarianten zeichnerisch und monetär im Detail abgebildet werden. Neben der Erstellung spezifischer Prozess- und Mengenflussdiagramme (Sankey-Diagramme), erhält die anlagenbezogene Budgetplanung als Teil der übergeordneten Investitionsplanung, in dieser Phase Einzug.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systemkonzepts erfolgt in der vierten Leistungsphase auf Basis der verfahrenstechnisch und kaufmännisch ermittelten Parameter. Die Rentabilitätsanalyse (Kapitel 9.3) beschränkt sich in dieser Phase auf einen definierten Bilanzierungsrahmen für die Betriebs- bzw. Produktionskostenermittlung der reinen Schredderanlage. Die spezifische Kalkulation der Einzelmodule unter Einbindung der Betriebskennzahlen aus dem Schreddertool sowie die systematische Anwendung des Simulationstools, führen zu einer segregierten Kosten-/Nutzenanalyse der Konzeptvarianten und einer stoffstrombasierten Erlösbetrachtung der Module. Auf Basis der aggregierten Zahlen lassen sich dann entsprechend risikominimierte Strategieentscheidungen zum weiteren Umgang mit der Bestandstechnik und den übergeordneten Unternehmenszielen finden.

Die Vorgehensweise in der Säule 5 verdeutlicht, dass die Weiterentwicklung einer Schredderanlage im Kontext der hier geführten Untersuchung nicht allein um ein innovatives Maschinendesign gestrickt ist, sondern den Gesamtprozess um den Schredder abbildet.

## **9.2 Technische Auslegung der Schredderanlage**

Die technische Auslegung der Schredderanlage orientiert sich an den Leistungsphasen 2 bis 4 der dargelegten Konzeptstudie. Wobei die in Phase 4 geführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, unter Achtung der Unternehmensgeheimnisse der TSR, im Zahlengerüst dieser Arbeit eingeschränkt ist. Die Leistungsphase 1 wird unter der Verschlusshaltung standortsensibler Daten ebenfalls außer Betracht gelassen. Die Darstellung relevanter Anlagenparameter erfolgt damit lediglich als Teilauszug der übergeordneten Konzeptstudie. Von der

Veröffentlichung bestandssensibler Daten und Forschungsergebnisse abgesehen, würde die Ausführung weiterer Anlagenparameter den Umfang dieser Dissertationsschrift sprengen.

Das nachstehende Anlagenkonzept ist ein individueller Ansatz im Umgang mit den Erkenntnissen und festgelegten Rahmenbedingungen der Kapitel 6 bis 8. Unter Berücksichtigung der Bezugsgrößen aus Kapitel 8.2, umfassen die folgenden Kapitel 9.2.1 bis 9.2.4 technische Ausführungen und Systemansätze

- zum Maschinendesign,
- zu diversen Abgasreinigungsverfahren,
- zu Innovationen in der Störstoffdetektion,
- zur Aufbereitung von Stoffströmen und
- zu der automatisierten Erfassung von Maschinen- und Betriebsdaten.

Die in den letztgenannten Kapiteln zusammengeführten Techniken sind u.a. das Ergebnis einer in 2018 länderübergreifend durchgeführten Ausschreibung über die in Tabelle 17 aufgezeigten Produktionseinheiten. Die Auswahl der potentiellen Ausschreibungsteilnehmer erfolgte auf Grundlage eines Technologie-Benchmarkings, diverser Fachmessenbesuche und Anlagenbesichtigungen in den Jahren 2016 bis 2018.

Tabelle 17 liest sich wie eine Bewertungsmatrix. Jede Zeile steht für einen separaten Anlagen- oder Systemhersteller aus Europa oder den USA. Alle mit „x“ gekennzeichneten Felder stellen das im Rahmen der Ausschreibung abgestimmte Produktportfolio bzw. den technisch möglichen Lieferumfang des jeweiligen Herstellers dar. Die farblich hinterlegten Felder (gelb und/oder grün) markieren den effektiv angefragten Lieferumfang. Grün hinterlegt sind solche Felder, die vollständig und in Form eines verwertbaren Angebots eingegangen sind.

**Tabelle 17: Ausschreibungsumfang Schredderkonzept in 2018**

	Schredder	Ablufttechnik	TVOC-Technik	SSF-Linie	SLF-Linie	Infrastruktur
DE			x			
DE			x			
USA			x			
DE		x				
AUS		x	x			
DE		x	x		x	
DE					x	
DE	x	x	x	x	x	x
DE	x					
IT	x	x	x	x	x	x
USA	x	x		x	x	
USA	x	x		x		
USA	x	x		x		
UK	x	x	x	x	x	
DE					x	
DE				x	x	

Die Auswahl der Ausschreibungsteilnehmer erfolgte auf Basis des in Kapitel 8.2.3 vermittelten Leistungsverzeichnisses. Auf Grund der Fülle an etablierten Lösungen und der geringen Bedeutung für den umweltrechtlichen Schwerpunkt dieser Studie, ist die Konzeptionierung der SSF-Aufbereitung von der Ausschreibung ausgeschlossen.

Um die hersteller- sowie länderspezifischen Produktmerkmale und Potentiale der marktverfügbaren BVT maximal auszuschöpfen, wurde ein entsprechend schlankes Lastenheft aufgesetzt. Die Systemgrenzen des ausgeschriebenen Lastenheftes stellen sich wie folgt dar:

- Festlegung des spezifischen Sortenspektrums im Input sowie die prozentuale Gewichtung der Outputfraktionen.
- Definition der Schüttgewichtsuntergrenze für die Sorte 4.
- Festlegung der geforderten Durchsatzleistung in Hinblick auf die etablierten Vertriebsmengen.
- Nennung der genehmigten Betriebszeiten (prognostizierte Laufleistung am Tag).
- Einschränkung nur weniger maschinenbautechnischer Randparameter für die Auslegung der Mühle und Peripherie.
- Klare Vorgabe der Emissionsgrenzwertanforderungen an das Abgasreinigungssystem (Gesamtstaub (5 mg/Nm<sup>3</sup>) und TVOC (20 mg/Nm<sup>3</sup>) als Tagesmittelwert).

Von den ursprünglich zwölf angefragten Unternehmen, haben trotz schriftlicher Vorabstimmung, nur Sieben ein verwertbares Angebot eingereicht und können anteilig in die Anlagenprojektierung einbezogen werden. Die Ursachenforschung zu der reduzierten Rückmeldung hat keine validen Erkenntnisse gebracht, sodass im weiteren Verlauf auf jegliche Form der Spekulation verzichtet wird.

Die wichtigsten Innovations- und Forschungsergebnisse der Konzeptstudie werden in den nachfolgenden Kapiteln zusammengefasst.

## **9.2.1 Maschinendesign**

Die nachfolgende Zusammenstellung zum Maschinendesign ist weder abschließend, noch erhebt sie Anspruch auf Vollständigkeit im Sinne einer technischen Funktionsbeschreibung des Schredderprozesses. Sie dient der selektiven Darstellung solcher Modellansätze, die im Rahmen der maschinen- und prozesstechnischen Auslegung der Schredderanlage, unter dem Einfluss der genannten Rahmenbedingungen ausgearbeitet wurden.

Die verfahrenstechnische Auslegung des Schredders, speziell des Zerkleinerungsprozesses, ist i.d.R. Aufgabenstellung der Systemlieferanten. Im Idealfall werden die anwenderspezifischen Erfahrungswerte aus dem Betrieb und der Instandsetzung solcher Anlagen, in den Entwicklungsprozess der Mühle und ihrer Maschinenelemente eingebunden. Heute existieren weltweit nur noch wenige Systemlieferanten, die eigene Schredderanlagen im Markt betreiben. Der Innovationsgrad im Schreddersegment wird damit wesentlich vom Anwender bestimmt. Auf Grund der geringen Stückzahlen, besonders im europäischen Markt und dem vergleichsweise hohen Planungs- und Konstruktionsaufwand, finden nur wenige wesentliche Weiterentwicklungen Einzug in das Mühlendesign von Großschreddern.

Die in Kapitel 3.3.1 aufgeführten Produktionsanforderungen bilden die Basis der verfahrenstechnischen Auslegung des Schredderprozesses. Leistungsfähigkeit bzw. Durchsatz (Quantität) und Produktanforderung (Qualität) entscheiden über Dimensionierung und Aufbereitungstiefe. Der konstruktive Auslegungsprozess ist maßgeblich durch die Zwangslage zwischen Qualität und Quantität geprägt. Massenleitungsfähigkeit und Qualitätsanspruch an das Endprodukt, wirken unter wirtschaftlichen Aspekten betrachtet, ab einer gewissen Größenordnung gegenläufig und bestimmen nachhaltig, von welcher Seite aus der Designansatz geführt wird.

Im Rahmen der Konzeptstudie wurde untersucht, ab welcher Leistungsgröße das Verhältnis aus Durchsatz und Produktqualität (ausgegeben in Schüttdichte und Aufschlussgrad) in

einem negativen Ergebniseffekt resultiert. Für die Bestimmung des besagten Scheitelpunktes werden sowohl betriebliche, maschinentechnische, als auch stoffstromgebundene Parameter berücksichtigt und in einem mathematischen Modell zusammengeführt.

Das Modell umfasst u.a. die folgenden in Tabelle 18 aufgelisteten Produktionseinheiten (Einzelmaschinen und ihre Maschinenelemente) sowie Parameter und ist primär auf die Materialzuführung und den Zerkleinerungsvorgang am Schredder ausgelegt. Neben der Zusammensetzung [%] und Schüttdichte [t/m<sup>3</sup>] des Vormaterials, stellen diese die wesentlichen Ausgangsgrößen für die qualitative und quantitative Lenkung des Stoffstroms dar.

**Tabelle 18: Teilauszug der Baugruppenzuordnung und Parametrisierung an Schreddern**

1. Zuführung	2. Mühle	Rotor	Eigenschaften/Auszug	Einheit
1.1 Beladeeinheit	2.1 Rotor	2.1.1 Form (Ausführung)	-	-
1.2 Plattenband	2.2 Gehäuse	2.1.2 Hammer [63]	2.1.2.1 Material	-
1.3 Schurre	2.3 Kardanwelle	2.1.3 Kappen	2.1.2.2 Hammermasse/Dichte	[kg, kg/m <sup>3</sup> ]
1.4 Treibrollen	2.4 Kupplung/ Rheostat	2.1.4 Pin Protectors	2.1.2.3 Form (Stärke und Länge)	[mm]
1.5 Antriebstechnik	2.5 Drehmo- mentbegrenzer	2.1.5 Achshülsen	2.1.2.4 Anzahl (Hammerbild)	-
-	2.6 (Halte-)Bremsen	2.1.6 Hammerachsen	2.1.2.5 Schlagkreisdurchmesser	[mm]
-	2.7 Schreddermotor	2.1.7 Scheiben	2.1.2.6 Abstand zur Rotorwelle	[mm]
-	2.8 Systemüber- wachung	2.1.8 Rotorwelle	2.1.2.7 Schwerpunkt	-
-	-	2.1.9 Rotorlagerung	2.1.2.8 Umfangsgeschwindigkeit	[m/s]
-	-	-	2.1.2.9 Kinetische Energie	[J]

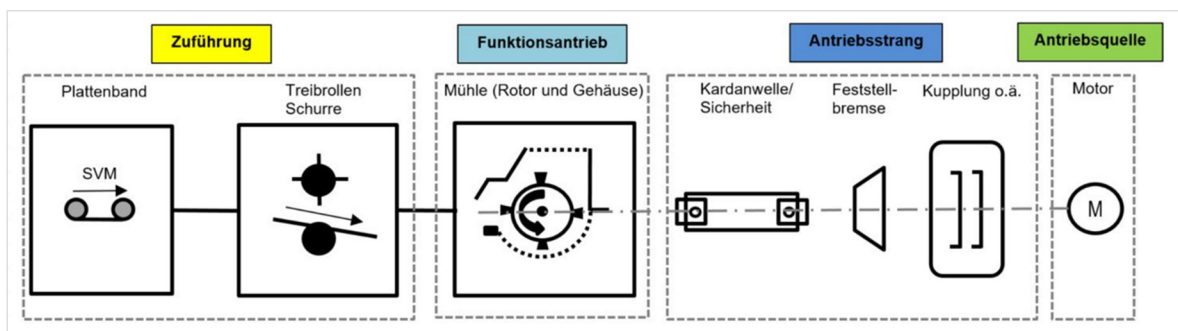
Zuführung und Mühle bilden eine Produktionseinheit und werden über die ersten beiden Spalten der Tabelle in ihre wesentlichen Maschinenelemente bzw. Arbeitswerkzeuge aufgeschlüsselt. Diese wiederum lassen sich durch diverse Parameter oder Eigenschaften beschreiben. Der blaue Pfad in Tabelle 18 zeigt die regel-, bzw. veränderbaren Eigenschaften für Hämmer in der Baugruppe „Rotor“ auf. Die Aufschlüsselung orientiert sich dabei im We-

sentlich am Antriebskonzept der Abbildung 47. Aus der Wahl einer bestimmten Rotorbauweise (Kreuz-, Arm- oder Scheibenrotor) in gekappter oder offener Ausführung, ergeben sich die Maschinenelemente und Zerkleinerungswerkzeuge entsprechend.

Die Aufschlüsselung des Gehäuses führt u.a. zu einer Parametrisierung der Dimension (Länge, Breite und Tiefe), Form (Wabe, Quadrat, Winkelgebung), Anzahl der Löcher (Lochfläche und Verteilung/Segmentierung) und Biegeradius des Unterrostes.

Bei der/den oberen Treibrolle(n) werden Parameter, wie der Rollendurchmesser [mm], die Breite und Einzugshöhe [mm], die Umfangsgeschwindigkeit [m/s] und die Verdichtungskraft [kN] berücksichtigt.

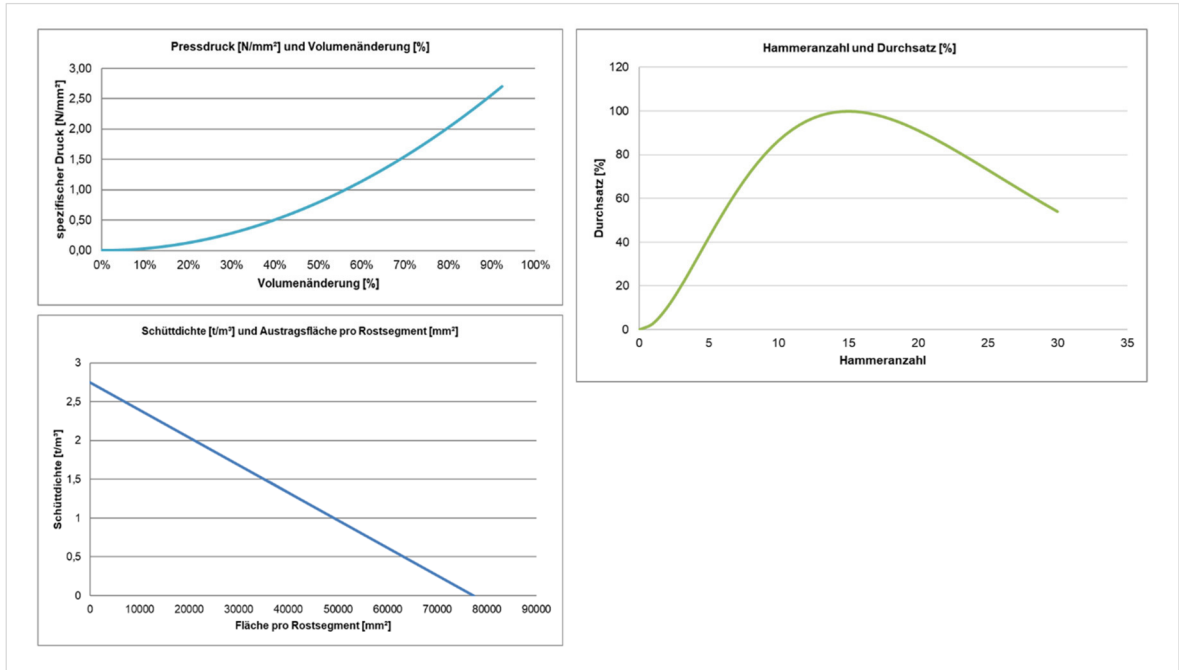
Den Beispielen folgend, werden weitere Zuordnungen für den Antriebsstrang am Schredder und die Antriebsquelle vorgenommen.



**Abbildung 47: Produktionseinheit Schredder inklusive Baugruppenaufschlüsselung**

Im Modell werden die relevanten Parameter und ihre Einflussgrößen schließlich auf den Durchsatz und die Qualität des Schredderschrotts entsprechend, mathematisch gewichtet und in einem Simulationstool miteinander verknüpft.

Ein Auszug aus dem Simulationstool findet sich in Abbildung 48. Hier werden der Einfluss der Treibrolle auf die Vorverdichtung des Inputmaterials, die Auswirkungen der Hammerzahl auf den Durchsatz und der Zusammenhang von Austragsfläche je Unterrostsegment und Schüttdichte, quantitativ oder qualitativ in Diagrammverläufen für einen Großschredder aufgezeigt. Die kalkulierten Werte sind beispielhaft sowie modellgebunden und unterstellen eine bauliche Regression zwischen der Antriebsleistung und Maschinengröße.



**Abbildung 48: Auszug Simulationstool für die Parametrisierung des Schredderprozesses**

Das Simulationstool umfasst neben der Aufschlusszerkleinerung weitere Produktionseinheiten aus dem dritten und vierten Schreddersegment (siehe Abbildung 3), wie die Mühlenentstaubung, die Windsichtung und Magnetseparation im Downstream.

Grundsätzlich ersetzt das Simulationstool das konstruktive Maschinendesign des Herstellers nicht, führt aber in seiner Systematik zu zwei wesentlichen Effekten in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen. Zum einen reduziert sich das Risiko in der Anlagendimensionierung, zum anderen bindet das Modell das gesammelte Erfahrungs- und Fachwissen des Betriebes in ein Zahlenwerk ein.

Die numerische Darstellung der Fertigungseinzelprozesse in der Stoffstromverarbeitung an Schreddern liefert Ansätze für eine vollautomatisierte und energieoptimierte Beschickung und Steuerung des Schredders über die geläufigen SDA/SSS hinaus. Zukünftig können darauf zurückführend weitere Überlegungen zur digitalen Einbindung von Maschinen- und Produktionsdaten an Autoschreddern angestellt werden (siehe Kapitel 9.2.4).

## 9.2.2 Maßnahmen zur TVOC-Reduktion in der Schredderabluft

Die Auswahl eines geeigneten Abgasreinigungssystems in Folge der emissionsrechtlichen Änderungen sowie dem Umfang und der Form der zu erfassenden Emissionsquellen entsprechend, stellt sich als die Kernherausforderungen in der Weiterentwicklung der Schredderanlage dar.



Ebeling formuliert in seiner Monografie mit dem Titel „Abluft und Abgas“ von 1999 ein systemisches Ablaufdiagramm mit integriertem Fragenkatalog und Checkliste zur Auswahl der geeigneten Abluftreinigungstechnik [29]. Die Vorgehensweise in dieser systematischen Anlagensondierung, deckt sich im Prinzip und trotz des Alters, mit der Argumentationskette des gegenwärtigen Systemkonzepts.

Die Erweiterung oder Verbesserung einer verfahrenstechnischen Anlage, die der Abluftreinigung dient, wird bei Ebeling als Folge neuer rechtlicher Bestimmungen oder den Änderungen bzw. Erweiterungen der Produktion genannt (hier Säule 1). Auf Grund der Fülle an spezifischen Abluftreinigungsverfahren ist die Anwendung des Ablaufdiagramms als Leitfaden für den konkreten Einzelfall zu verstehen und bedarf einer ausführlichen Definition der Ausgangszustandsparameter (Fragenkatalog) [29]. Ein Prozess der in den Säulen 2 bis 4 des Systemkonzepts verankert ist. Die Entscheidung über die adäquate Verfahrenslösung und dafür notwendigen Schritte, wird über die Checkliste (Juristisches und Behördenverkehr, Organisation und Finanzen, Technik, Analytik und Personal) abgebildet. Das Systemkonzept deckt diese Schritte ansatzweise in der Übergangsphase von Säule 4 zu 6 ab.

Ebelings Methode versteht sich als eine praxistaugliche Sammlung von Verfahrensschritten zur risikominimierten Selektion und Projektierung einer, unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten, nachhaltigen Abgasreinigungstechnik.

Die Anwendung der Methodik auf den gegenwärtigen Sachverhalt der Schredderanlagenoptimierung, schließt eine Ertüchtigung bzw. Erweiterung der Bestandstechnik aus. Auf Grund der Emissionsbandbreite am Schredder ist der Selektionsprozess differenziert für staub- und gasförmige Schadstoffkomponenten durchzuführen. Im Ergebnis steht damit ein mehrschichtiges Abluftreinigungskonzept, das unterschiedliche Systemlösungen für den Entstaubungs- sowie TVOC-Teil der Anlage definiert. In Bezugnahme auf Abbildung 35 deckt das System darüber hinaus alle neuralgischen Bereiche der quellengebundenen Emissionsentwicklung ab. Eine klare Trennung der zu behandelnden Abgasströme vorausgesetzt, wird die Weiterentwicklung von Schredderanlagen damit zunehmend von der Emissionsquelle aus gesteuert.

Die Auswahl und Auslegung der geeigneten Ablufttechnik fällt i.d.R. nicht in den klassischen Aufgabenbereich des Schredderbetreibers. Aus der entsprechenden Fachexpertise heraus, wird diese Aufgabe den Systemherstellern, Ingenieurbüros oder diversen Forschungseinrichtungen zugeschrieben. Die Ausschreibungsergebnisse in Kapitel 9.2 zeigen jedoch, dass der Einsatz gewisser BVT für den schredderspezifischen Anwendungsbereich heute noch nicht ausgereift ist. In den folgenden Kapiteln 9.2.2.1 bis 9.2.2.3 werden solche Verfahren beispielhaft vorgestellt, die als Maßnahmen zur TVOC-Reduktion im Abgas der

Schredders teilweise eingesetzt werden, unter der konsequenten Anwendung des ausgearbeiteten Leistungsverzeichnisses (Kapitel 8.2.3), aber ökologische und/oder ökonomische Entwicklungsfelder aufweisen.

### **9.2.2.1 Regenerative thermische Oxidation (RTO)**

Die RTO, auch regenerative Nachverbrennung, wird im BREF als eine der vier Kernlösungen für die Beseitigung der VOC aus der Schredderabluft genannt. Im TA Luft-Entwurf erfolgt eine Auflistung dieser Technologie unter Nummer 5.2.11.2 als Teil der Maßnahmen zur Energieeinsparung. Eine beispielhafte Ausführung dieser Abgasreinigungstechnik als Inlinelösung für Schredderanlagen, findet sich jedoch und trotz der Nennung im Abschnitt der Zukunftstechnologien des BREF, nicht.

Die RTO versteht sich als eine sekundäre VOC-Emissionsminderungsmaßnahme und wird der Feinstaubentfrachtung am Schredder nachgeschaltet (VDI-Richtlinie 2442). Bei Betriebstemperaturen von 750 bis 1.250 °C werden VOC-Verbindungen nahezu vollständig oxidiert und in CO<sub>2</sub> und Wasser umgewandelt. Durch die Verwendung regenerativer Wärmespeicher (keramisch inerte Formteile), wird ein großer Teil der Enthalpie des Reingases in der Brennkammer zurückgewonnen und steht dem Oxidationsprozess unmittelbar zu Verfügung [34]. Die autotherme Fahrweise der Anlage ist für große Abluftströme mit niedrigen Schadstoffkonzentrationen (im Mittel 50 ppm) ohne die Zugabe von Brennstoff geeignet. In Verbindung mit dem effizienten Wärmeaustausch führt dies zu einer drastischen Reduzierung der Betriebskosten. Wirkungsgrade von 90 bis 98 % sind unter idealen Betriebsbedingungen bei mittleren Betriebstemperaturen von 750 bis 800 °C durchaus realistisch [31].

Die Firma SA Recycling LLC betreibt eine RTO an einem 9.000 PS Autoschredder in Kalifornien, USA. Die gesonderten Umweltauflagen der amerikanischen Betriebsstätte entsprechen für den Bereich Abluft und Abwasser annäherungsweise dem deutschen Standard. Dabei fordern die Behörden eine nachgewiesene VOC-Reduktion von 95 %. Die ursprüngliche Vorgabe der Behörde umfasste eine Minderung der reaktiven organischen Gase im Abgas des Schredders auf 5 t pro Jahr. Damit sind die umweltrechtlichen Vorgaben der SA Recycling LLC nicht zwangsläufig an einen festen Grenzwert gebunden.

Das seit 2012 installierte Abluftreinigungssystem besteht aus einer aufgesetzten Absaugeinrichtung oberhalb der Mühle, mit direkter Verbindung zur Vorfilterstufe und der RTO.

Das Prozessgasvolumen ist bei einer durchschnittlichen Durchsatzleistung des Schredders von 350 bis 400 t/h, auf 70.000 m<sup>3</sup>/h eingestellt.

Entgegen der herkömmlichen Ausführung einer Direktentstaubung, ist die Abzugseinrichtung baulich von der Mühle entkoppelt. Sie deckt die seitliche Schallschutzeinhausung des Schredderaggregats in Form einer Flachdachausführung, mit ausreichendem Sicherheitsabstand für die Druckentlastung, ab. Die Schallschutzeinhausung selbst ist zur Regulierung des Unterdrucks im Abgassystem einseitig ausgespart. Die Dimension und Lage der Aussparung richten sich nach den physikalischen Prozessluftanforderungen der Abgasreinigungsanlage. Abbildung 49 zeigt einen Teilabschnitt dieser konstruktiven Ausführungen.



**Abbildung 49: VOC-Reduktionseinrichtung SA Recycling LLC USA 2018**

Der Schredder wird im Semi-Wet-Verfahren betrieben. Die injizierte Wassermenge beträgt abhängig vom verarbeiteten Inputmaterial zwischen 100 und 200 l/min. Der teilweise schadstoffbehaftete, feuchte Wasserdampf wird über die Abzugseinrichtung erfasst und der Feststofffiltration zugeführt. Dieses der RTO vorgeschaltete System ist die sogenannte „TAME-Unit“ und eine Eigenentwicklung des Schredderbetreibers. Das zweistöckige Trockenfiltersystem ist eine aus sechs in Reihe geschalteten Standfiltereinheiten bestehende Partikel-, Öl- und Feuchtigkeitsbarriere. Nach der Vorbehandlung gelangt das Rohgas in den Prozessraum der RTO.

Das RTO-Modell der Firma CECO Adwest Environmental Corp. ist als Mehrkammersystem mit keramischer Füllkörperschüttung und nachgeschaltetem chemischen Nasswäscher zur Bindung der in der Verbrennungsluft enthaltenen sauren Gase mittels Natriumhydroxid, ausgeführt. Die Brennkammer verfügt über eine vorgelagerte Explosionsschutzeinrichtung (siehe Abbildung 49). Das abgeschiedene Prozesswasser gelangt in die betriebsinterne Abwasseraufbereitung zur Direkteinleitung.

In Summe soll das Abgassystem gemäß Hersteller eine TVOC-Reduktion von 98 % bewirken, aber einen minimalen VOC-Reststoffgehalt von 10 ppm garantieren. Die letzte offizielle Effizienz- bzw. Nachweismessung erfolgte im Zug der Anlageninbetriebnahme. Seither wird die Kontrolle des Wirkungsgrades stichprobenartig über den Einsatz von mobilen Messsonden zur Erfassung flüchtiger Gase und vornehmlich zur internen Verwendung durchgeführt. Auflagen über eine kontinuierliche Messung existieren vorerst nicht.

Die zusätzlichen Betriebskosten der Anlage belaufen sich ohne AfA (ca. 3 Millionen USD) und nach Aussage des Schredderbetreibers auf 1 USD/t Schredderschrott.

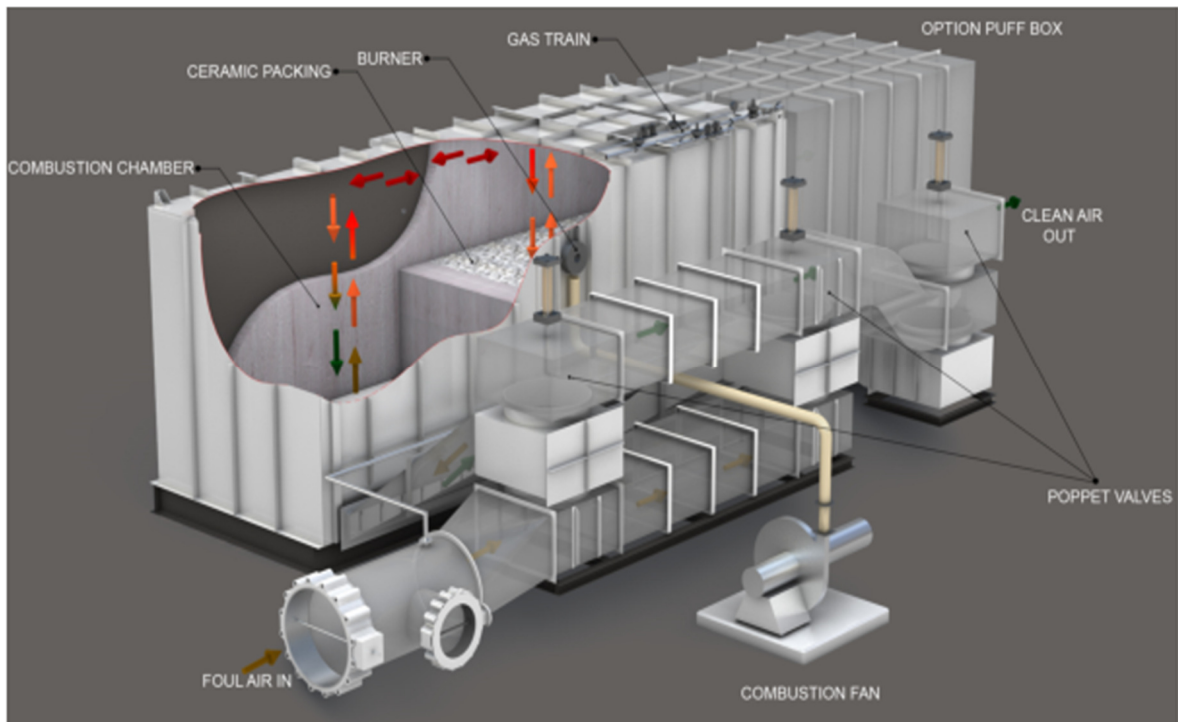
Im Rahmen der Konzeptstudie wurde das System für den deutschen Markt neu aufgesetzt und den Anforderungen des TA Luft-Entwurfes entsprechend modifiziert. Eine Abzugshaube in der Ausführung des amerikanischen Vorgängermodells ist für den nationalen Einsatz insofern unbrauchbar, dass die Erfassung der TVOC quellengebunden erfolgen soll. Die Variante der SA Recycling LLC führt die Erfassung der Emittenten aus einer diffusen Quelle heraus aus und konditioniert diese streng genommen mit der Aspirationsluft aus der Umgebung des Schredders. Trotz der Eignung der RTO-Technology für große Abluftströme mit niedrigen Schadstoffkonzentrationen, ist davon auszugehen, dass das System mit konstantem Zusatzbrennstoff betrieben werden muss (vergleiche auch Messergebnisse Kapitel 7.3.3). Im Vergleich zu den USA sind entsprechend höhere Brennstoffpreise für die Prozesskostenkalkulation anzusetzen. Die Einbindung einer zusätzlichen Rückgewinnung bei hohen VOC-Konzentrationen im autothermen Betrieb, ist weniger wahrscheinlich. Ein positiver Effekt im Rahmen der Matrixzertifizierung nach ISO 50001 bleibt damit ebenfalls aus. Hinzu kommt, dass der Betrieb der Anlage durch eingeschränkte Schichtmodelle unterbrochen wäre. Kaltanlaufzeiträume müssten entsprechend berücksichtigt werden.

Der Umgang mit dem hohen Feuchtegehalt der Abluft, ist in Verbindung mit den geläufigen europäischen Trockenfiltersystemen separat zu beurteilen.

Auf Grundlage dieser Beschränkungen, bietet das Unternehmen CECO Adwest Environmental Corp. eine RTO als Dreikammersystem inklusive Erdgasinjektor, mit einer mittleren

Wärmerückgewinnungsquote von 97 % bei voller Flussrate an. Unter den genannten Prozessparametern (70.000 m<sup>3</sup> und 900 °C) dürfte der Energiebedarf der Anlage bei dieser Rückgewinnungsquote immer noch bei ca. 500 kWh liegen.

Der Hersteller garantiert eine TVOC-Reduktion von 99 % (Zielwert 25 ppm) unter Voraussetzung idealer Betriebsbedingungen, die wiederum zu einer 30 %igen Brennstoffkosteneinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Systemen aus diesem Segment führen soll; eine Analyse der spezifische VOC-Zusammensetzung des Schredders und eine Computermodellierung vorausgesetzt. Abbildung 50 stellt das Produkt im Aufbau dar.



**Abbildung 50: RETOX-Dreikammer-RTO CECO Adwest Environmental Corp. ©**

Bei konstanten Betriebstemperaturen zwischen 800 und 900 °C sowie einer erforderlichen Prozessluftmenge von 50.000 m<sup>3</sup>/h, laufen für die RTO exklusive der chemischen Nasswäscheinheit und AfA, je nach durchschnittlicher TVOC-Beladung der Abluft (20 bis 250 mg/Nm<sup>3</sup>) in der klassischen Zweischicht, Prozesskosten von 18 bis 23 EUR pro Betriebsstunde auf. Inwiefern dieser Mehrkosten für eine Schredderprozess ausschlaggebend sind, ist für jeden Schredderbetrieb individuell zu bewerten und soll nicht Teil dieser Auswertung sein.

In Folge der TA Luft-Novelle (Nummer 5.1.2) wird der Einsatz einer RTO (an Schredderanlagen) nur unter entsprechenden Sonderregelungen genehmigt werden können.

### 9.2.2.2 Adsorbenzien in der Abluftreinigung

Die Anwendung von AK-Filtern als sekundäre Emissionsminderungsmaßnahme von VOC im Abgas von Schredderanlagen, hat sich in den letzten fünf Jahren, und entgegen dem ursprünglichen Standpunkt der deutschen Schredderwirtschaft [14], stark verbreitet.

Deutsche Hersteller von Lufttechnologien haben in den vergangenen Jahren vermehrte Kapazitäten in die Forschung und Weiterentwicklung von Systemlösungen investiert, die die Verwendung der AK als Adsorptionsmittel für organische Verbindungen an Großschreddern verfahrenstechnisch stabil und wirtschaftlich machen sollen. Entsprechende Ansätze führt das BREF beispielhaft im Kapitel der Zukunftstechnologien auf.

In Rahmen der durchgeführten Konzeptstudie, wurden AK-gestützte Abluftkonzepte gezielt angefragt und auf Basis der eingereichten Informationen ausgewertet. Die Begehung diverser im Betrieb befindlicher Anlagen hat zu dem Entschluss geführt, vor der finalen Evaluation dieser Prozesslösung als vertretbare BVT, die Anforderungen des Adsorptionsmittels an die Abgaszusammensetzung des Schredders genauer zu untersuchen und zu verstehen.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieser Abgasreinigungstechnik ist entscheidend, wie hoch die Standzeit der AK unter dem Einfluss der spezifischen Abgaszusammensetzung am Schredder ist (empirische Entwicklung einer schredderspezifischen Durchbruchskurve) und welche Faktoren die Desorption der AK beeinflussen. Damit nehmen Adsorptionskapazität und -geschwindigkeit der AK am Schredder eine zentrale Rolle ein (Kapitel 3.3.2.1). Im Rahmen der emissionstechnischen Verfahrensbewertung ist weiter relevant, welche Störstoffe von der AK adsorbiert werden und in welcher Konzentration (Rückhaltevermögen). Für einen stabilen und sicheren Einsatz des Systems im Betrieb, müssen darüber hinaus verfahrenstechnische Bedingungen geschaffen sein, die die Selbstentzündung der AK verhindern (auch Brandkonzepte), die Staubfracht im Schadgas maximal reduzieren und mit den systemimmanenten Druckstößen des Schredders kompensatorisch umgehen (Explosionsgefährdung) [14].

Im Zeitraum 2014 bis 2015 wurden bei der TSR in Zusammenarbeit mit Industriepartnern aus dem Abluftsegment (Firma Venti Oelde GmbH), Versuche mit einer AK-Filtereinheit als End-of-Pipe-Lösung durchgeführt. Für die Reduzierung der VOC im Abgasstrom des Schredders, werden Festbettadsorber eingesetzt (VDI-Richtlinie 3674). Das immanente Ziel des Messprojektes lag in der Reduzierung der VOC im Abluftstrom des Schredders und in der Ermittlung des Abscheidegrades der AK im Langzeitversuch.

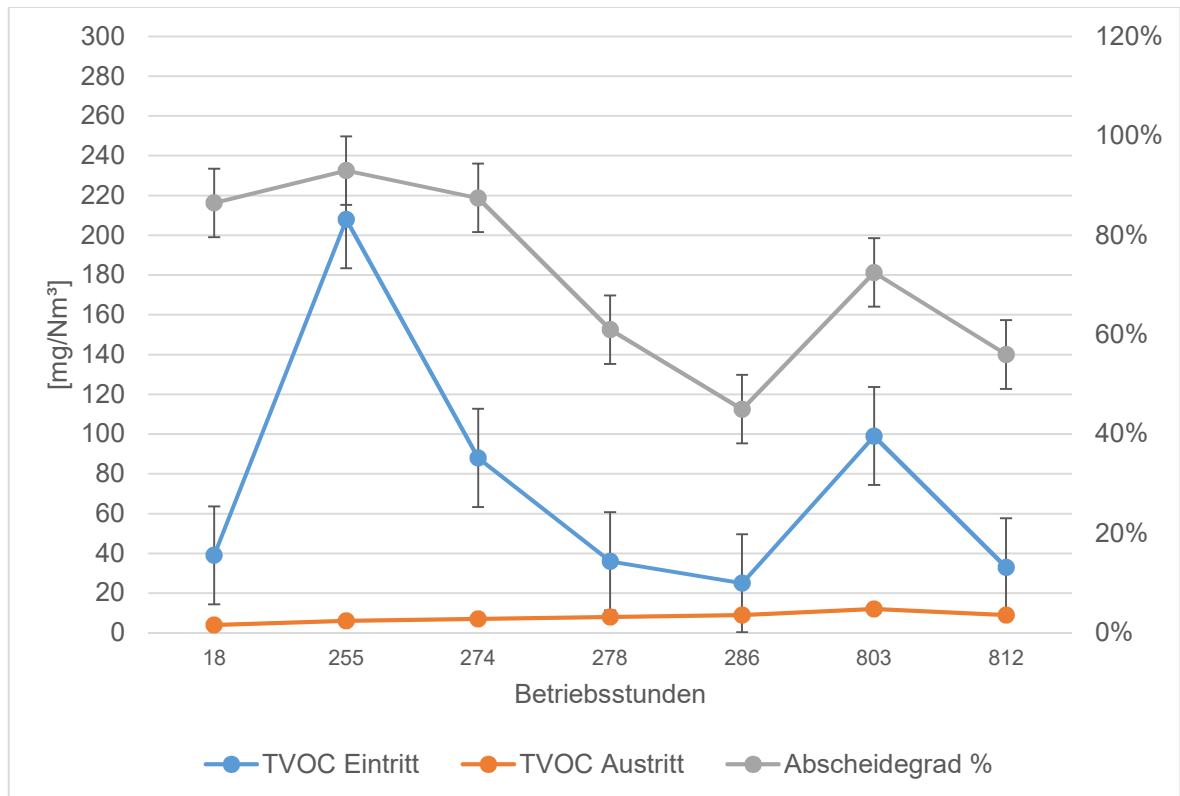
Der Betrieb der Pilotanlage erfolgte unter Einbindung eines Teilgasvolumenstroms aus der Schreddergehäuseentstaubung. Die Vorabscheidung des Rohgas wird an dieser Anlage im Zyklon, die Abscheidung der dispergiert im Abgas vorliegenden Feinstäube, im Venturiwäscher ausgeführt. Folgende Messgrößen der Versuchsanlage wurden im Laufe der 1.200 störungsfreien Betriebsstunden der Pilotanlage erfasst:

- die Ein- und Austrittstemperatur des AK-Filters,
- die Ein- und Austrittsfeuchte des AK-Filters,
- der Staubgehalt,
- der Volumenstrom im AK-Bett,
- die VOC-Konzentration im Ein- und Ausgang des AK-Filters,
- der Differenzdruck im AK-Filter,
- der Differenzdruck der Vorfiltereinheit,
- die Kohlenstoffmonoxidkonzentration im Ein- und Austritt für die Branderkennung,
- sowie die Ventilator Drehzahl der Versuchsanlage.

Die AK ist im Laufe des Versuches mehrfach auf den Beladungsgrad und die auf der AK adsorbierten Bestandteile analysiert worden. Eine messtechnische Erfassung bzw. Beprobung sowie Bewertung von Staub- und VOC-Inhaltsstoffen im Roh- und Reingas erfolgte während der Versuchsphase nicht, da von den Behörden an dieser Stelle formalrechtlich nicht gefordert. Für eine ganzheitliche Bewertung der AK als langfristige Lösung an Schreddern wäre diese Untersuchung sinnvoll, wie sich im Laufe der folgenden Abschnitte zeigt.

Die Ergebnisse in Abbildung 51 geben einen Auszug des Abscheideverhaltens der AK über einen Zeitraum von 812 Betriebsstunden wieder. Das Diagramm verdeutlicht, dass der Abscheidegrad mit zunehmender Standzeit des Filters abnimmt. Die Beladung des Adsorbens steigt.

Generell sinkt der Abscheidegrad mit der Konzentrationsabnahme im Rohgas. Im dargestellten Ausschnitt ist der Schwankungsbereich der Rohgasbeladung speziell am Anfang der Messauswertung sehr hoch (ca.  $160 \text{ mg/m}^3$  bzw. 80 %), der Abscheidegrad jedoch bewegt sich in diesen ersten 274 Stunden lediglich in einem Delta von 10 %. Mit zunehmender Beladung der AK erhöht sich der Schwankungsbereich, sodass für eine Konzentrationsbandbreite im Rohgas von nur  $60 \text{ mg/m}^3$ , die Schwankungsbreite des Abscheidegrads bei etwa 35 % liegt (286 bis 812 Stunden). Das aufgezeigte Verhältnis verändert sich zu Ungunsten des Abscheidegrades.



**Abbildung 51: Auswertung des Abscheidegrades einer AK-Pilotanlage Venti Oelde GmbH von 2014 bis 2015**

Darüber hinaus wird deutlich, dass trotz einer relativ hohen TVOC-Belastung in der Prozessluft, TVOC-Emissionswerte von weniger als 10 mg/m<sup>3</sup> im Reingas erreicht werden. Mit zunehmender Beladung der AK steigen die TVOC-Austrittswerte leicht an (bis 12 mg/m<sup>3</sup>). Der AK-Filter hat nachweislich während der gesamten Betriebszeit 90 bis 95 % der gemessenen VOC-Verbindungen abgeschieden.

Die Firma Venti Oelde GmbH hat u.a. auf Grundlage dieser Erkenntnisse AK-basierte Systemlösungen entwickelt, die heute bereits bei Marktbegleitern in der Anwendung sind. Prinzipähnliche Abluftreinigungsanlagen finden sich auch bei den Firmen R+R-BETH GmbH und R-Power Umwelttechnik & Consulting GmbH, die in diesem Segment eine gewisse Vorreiterstellung einnehmen. Alle drei Hersteller haben individuelle konstruktive Wege gefunden, die genannten betrieblichen Anforderungen an die Ablufttechnik für bestehende Schredderanlagen zu berücksichtigen und dabei die notwendigen Sicherheitsvorgaben (Explosionsschutzentkopplung der Risikobereiche) einzuhalten.



Ein zurzeit erprobtes Anlagenkonzept eliminiert bspw. die Nassentstaubung aus dem Abgasreinigungsstrang. Der Verzicht auf einen Nasswäscher im gesamten Abgasreinigungssystem ist unter verfahrenstechnischen (Reduzierung der Feuchte in der AK), energetischen (Prozesskosten) als auch emissionsrechtlichen (Einhaltung der Staubwerte, keine medienübergreifende Schadstoffverschleppung etc.) Gesichtspunkten reizvoll (siehe rückwirkend auch BVT 23 sowie Kapitel 6.3.2 und 7.4). Gemäß einer Prozesskostenkalkulation der Venti Oelde GmbH, können bei einer Gesamtabluftmenge von 88.000 m<sup>3</sup> und einer effektiven Anlagenauslastung von 85 %, ca. 190 kWh Strom pro Betriebsstunde einer druckstoßfesten Trockenentstaubung eingespart werden. Dem Verlust der Vorteile eines Nasswäschers in Bezug auf Verpuffungsereignisse, wird hier mit einer patentierten, aber nicht zertifizierte Flammwächterstufe in unmittelbarer Nähe der Schredderabsaugvorrichtung entgegengewirkt (Risikominderung). Inwieweit die BVT 15 und 16 des BREF im Zusammenhang mit diesem kontrollierten Zündvorgang greifen, muss anlagenspezifisch und auf Behördenebene untersucht sowie festgelegt werden.

Des Weiteren ist der Einsatz einer AK-Lösung für die BVT 22 interessant. Die in Kapitel 6.2.13 beschriebenen Forderungen des BREF zur bewussten Verwendung von Recyclingmaterialien als Ersatz- und Zusatzstoff im Produktionsprozess, kann für eine reaktivierte AK eingesetzt werden.

Durch den praktischen Feldeinsatz von AK-Filtern, sind die in 2012 gelieferten Fakten [14] heute insofern überholt, dass es mittlerweile aussagefähige Zahlen zum Kosten-/Nutzenverhältnis unter wirtschaftlich und technisch vertretbaren Verhältnissen an Großschredderanlagen geben sollte.

Leider sind die derzeit angesetzten Zusatzkosten nur als Richtwert der Hersteller kommuniziert, sodass die TSR als potentieller Systemeinsteiger nur auf eine theoretische Kalkulationsbasis zurückgreifen kann. Die prognostizierten operativen Mehrkosten der Einrichtung belaufen sich für eine 70.000 m<sup>3</sup> starke Anlage auf ca. 0,5 €/t Input bei einer Verwendung des AK-Bettes von ein bis eineinhalb Jahren und einer entsprechenden Desorption. Wobei anzumerken ist, dass die spezifischen Kosten bei Großschredderanlagen auf Grund des Leistungs-Tonnage-Abluftverhältnisses geringer ausfallen.

Zur Verbesserung der Filterstandzeiten werden Bypasslösungen für schadstoffunkritische Inputmaterialien oder die Rückführung von Teilluftströmen der Direktentstaubung (Zirkulation) angeboten. Unter idealen Betriebsbedingungen und einem ausgeprägten Verständnis über die emissionstechnischen Effekte des verarbeiteten Vormaterials, sind diese Ansätze plausibel, aber zum aktuellen Stand der Technik wenig praktikabel. Konsequenter Weise

muss die gesamte Schredderabluft während der Materialverarbeitung über die Abgasreinigungseinrichtung gefahren werden. Das schließt die Aspirationsluft der Windsichtung mit ein.

Die Konditionierung des Vormaterials ist ein gängiges Mittel zur schadstofflichen Konzentrationsminderung im Produktionsprozess und kann für die Beladungsgrenze der AK von Vorteil sein. Diese Maßnahme wird allerdings in der gegenwärtigen Arbeit, speziell in Hinblick auf die Anforderungen an ein massen- und sortenleistungsfähiges Schredderaggregat, nicht als valide Systemlösung vertreten. Eine Reduzierung oder Vermengung von Inputströmen für die Einhaltung der Emissionsgrenzen oder eine Standzeitverlängerung der Ablufttechnik, ist aus ökonomischen Gesichtspunkten wenig zielführend.

In Zusammenarbeit mit der Firma Donau Carbon GmbH wurde der Aspekt der Betriebskosten genauer betrachtet. Für die Prozesskostenkalkulation ist neben der angeführten Sättigungsgeschwindigkeit die Sicherstellung der Desorptionsfähigkeit der AK entscheidend.

Das Anforderungsprofil für die Reaktivierung der AK ist streng. So kann die AK ab einer Beladungskapazität von 20 % i.d.R. nicht mehr aufbereitet werden.

Bei einem Abluftmanagement von 70.000 m<sup>3</sup>/h, in Verbindung mit den neuen Grenzwertbestimmungen sowie den TVOC-Referenzwerten aus Kapitel 7.3.4, dürfte die Beladungsgrenze der AK streng genommen spätestens nach 1.800 bis 2.000 Betriebsstunden erreicht sein.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, welche Schadstoffkomponenten die Reaktivierung der AK unabhängig der spezifischen Sättigungsgrenze negativ beeinflussen. Welche speziellen VOC und in welcher Konzentration bereiten dem Adsorptionsmittel Probleme und welchen Ursprung haben sie?

Neben den bereits ausführlich beschriebenen PCDD/F, PCB und B(a)P gehören Stickstoffe, Schwefel, Iod, F, Phenole und andere polyzyklische sowie aromatische VOC (PAK und BTEX) zu solchen Stoffen- und Stoffgruppen, die im Falle einer Adsorption auf der AK die Reaktivierung verhindern [12] [34]. Die Liste deckt sich teilweise mit den in Tabelle 9 angeführten Bagatellmassenströmen.

Die AK wäre dann als Sondermüll zu entsorgen. Eine Entsorgung würde den Prozess am Schredder u.U. unwirtschaftlich machen. Der Preis für eine reaktivierte AK liegt ca. 50 % unterhalb einer Neukohle, wobei die AK im Idealfall fünf bis sechs Mal desorbiert werden kann.

Ein Großteil der in Tabelle 19 aufgeführten Stoffe deckt sich mit den gemessenen Staub- und Abgasinhalstoffen der Tabelle 14, sind aber nur ein Indikator dafür, mit welchen Stoffen die AK theoretisch beladen wurde. Für eine Aussage, welche Komponenten an der AK vorbeigegangen sind, reicht diese Analyse nicht aus.

Für die Auswahl einer geeigneten AK am Schredder ist eine Aussage über die Rohgaszusammensetzung, speziell der Kohlenstoffverbindungen (lang- oder kurzkettig), generell entscheidend [31]. Kontinuierliche und diskontinuierliche Sondermessungen zur Aufnahme von relevanten Störstoffen vor und nach der Gewebefiltereinheit sowie nach dem AK-Filter, würden an dieser Stelle Klarheit schaffen. Weiter könnten die Erkenntnisse bei der Einbindung stoffstromrelevanter Daten dazu nützen, die fehlenden Größen aus Kapitel 7.3.2 herzuleiten und eine Verbindung zu den erzeugten SLF-Mengen herzustellen.

Ein entsprechendes Messprojekt mit den in Tabelle 19 aufgeführten Parametern und den Messanforderungen aus Kapitel 7.4 ist für die Analyse des Abscheidegrades und der Adsorptionsgeschwindigkeit der AK konzipiert, aber im Zeitraum der dargelegten Konzeptstudie nicht freigegeben worden.

**Tabelle 19: Messparameter für die Evaluation der AK in der Ablufttechnik an Schreddern**

Parameter (Stoffe- und Stoffgruppen)	Messstellen	Anzahl Messungen je Messstelle	Dauer der Messung
TVOC (FID)	2 und 3	Langzeitmessung drei Tage	
PCDD/F, PCB, PAK	1 bis 3	2	4 bis 6 h
Gesamtstaub	1 bis 3	6	30 min
As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Sn, zusätzlich Hg dampförmig	1 bis 3	6	31 min
F, Cl, Br, gasförmig	1 bis 3	6	32 min
F, Cl, Br, I partikelförmig leicht löslich	1 bis 3	6	33 min
VOC-Screening	1 bis 3	6	34 min

Unter der Annahme, dass die Filtervorabscheidung nicht in der Lage ist die Gesamtheit der AK-kritischen Störstoffe zu erfassen, wird davon ausgegangen, dass eine Reaktivierung der AK generell in Folge des Dauereinsatzes an Schredderanlagen unrealistisch ist. Des Weiteren gestaltet es sich auf Grund der Verarbeitungsbandbreite an Großschreddern als reinweg schwierig, Prozessluftbedingungen zu schaffen, die stets zur AK passen.

In Kombination der gewonnenen Erkenntnisse zur AK und den messtechnischen Erhebungen in Kapitel 7, rechnet die TSR mit zusätzlichen Betriebskosten von 0,5 bis 1,5 €/t produziertem Schredderschrott (ohne AfA) für eine Abgasreinigungslösung unter dem Einsatz von AK und in Abhängigkeit der operativen sowie verfahrenstechnischen Gegebenheiten vor Ort.

Ohne die Klarheit der geforderten Sondermessungen ist davon auszugehen, dass der Einsatz von AK im dargelegten Umfang, vorerst in der Anlagenplanung zurückgestellt wird. Eine Entwicklung des Schredders von der AK aus, deckt sich nicht mit den Forderungen nach einer ablufttechnischen Lösung, die die Negativeigenschaften der VOC in Summe bedient. So gilt es einer Risikoinvestition in diesem Feld, durch weitere Forschungsarbeit vorzubeugen.

### **9.2.2.3 Fotooxidation**

Einen möglichen Ansatz, die Vorzüge der AK zu nutzen, die Standzeit dieser zu verlängern und die eingesetzten Mengen des Adsorbens zu verringern, liefert die folgende Verfahrensmethode zur Reduzierung des TVOC im Abgasstrom des Schredders.

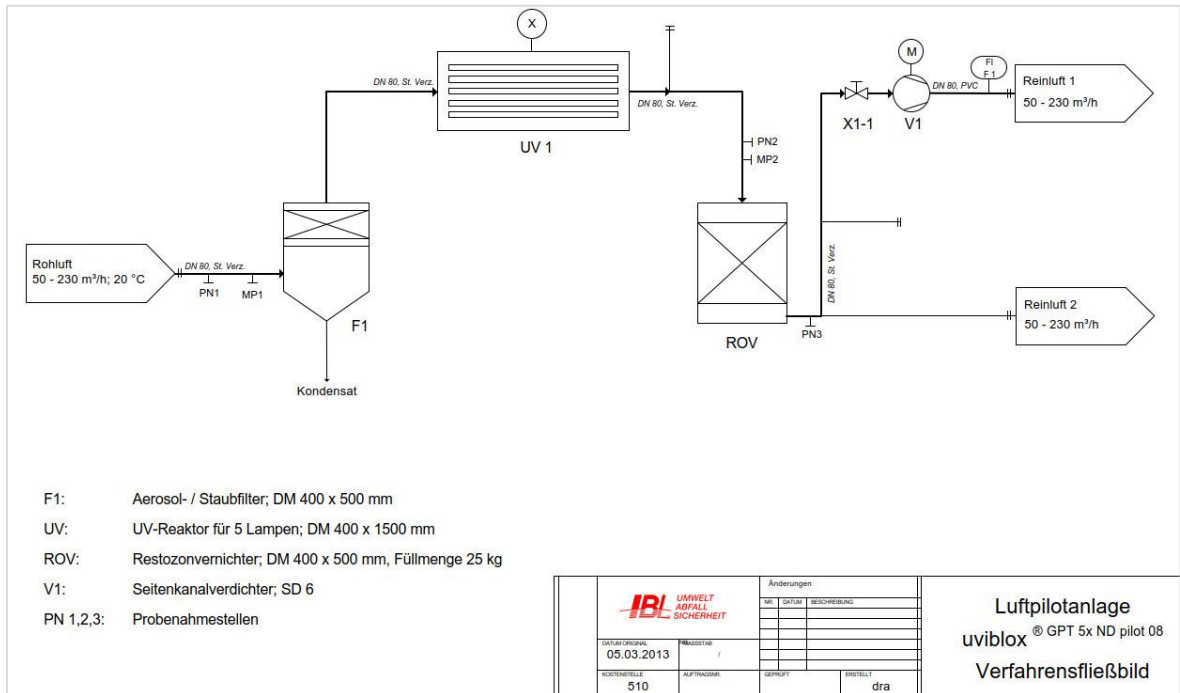
Im Auftrag der TSR und mit Unterstützung der REMONDIS Assets & Services GmbH hat die Firma IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH in 2016 eine Machbarkeitsstudie zur Abreinigung der VOC mittels Fotooxidation sowie der Planung und Auslegung einer alternativen Reinigungsanlage an einem Referenzschredder der TSR durchgeführt.

Will man einen Schadstoff direkt durch radikalische Kettenreaktionen mittels UV-Licht spalten, muss dieser Schadstoff die entsprechende Wellenlänge des Lichts absorbieren können. Das Absorptionsmaximum des Schadstoffs und das Emissionsmaximum der Lampe sollten idealer Weise zusammenfallen. Dieser Reaktionsprozess wird als Fotodissoziation bezeichnet.

Die photochemische Wirkung der UV-Strahlung wird gezielt zur Zerstörung der VOC eingesetzt. Die hierbei ausgelösten Reaktionen laufen bei ausreichender Bestrahlungsdauer bis zum vollständigen Abbau des Schadstoffes zu CO<sub>2</sub> und Wasser in der Abluft ab.

Durch Aufbrechen von Sauerstoffmolekülen in Atome und die anschließende Anlagerung eines Sauerstoffradikals an ein Sauerstoffmolekül, wird Ozon gebildet. Je höher die Intensität der Vakuum-UV-Strahlung, desto mehr Moleküle werden aufgebrochen. Die Reaktionsrate steigt, es wird mehr Ozon gebildet. Durch die erhöhte Ozonbildung werden der Ozonolyseprozess und alle nachgelagerten Reaktionsprozesse überproportional verstärkt.

Die Integration von fotolytisch aktiven Katalysatoren im Reaktionsraum bzw. nachgeschalteten oxidativen Katalysatoren, ist ein weiterer verfahrenstechnischer Ansatz, die genannte Oxidationsreaktion mit dem Schadstoff zu intensivieren. Der Restabbau der Schadstoffe kann katalytisch über die Verschiebung der Reaktionspotentiale und/oder die Verlängerung der Verweilzeit erfolgen [28].



**Abbildung 52: Pilotanlage Fotooxidation 2016 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH ©**

Abbildung 52 stellt die verwendete Pilotanlage im Verfahrensfließbild dar. Die Pilotanlage wurde dem Prinzip der direkten Fotooxidation entsprechend mit vorgeschalteter Glättungsstufe und nachgeschalteter Restozonvernichtung ausgeführt.

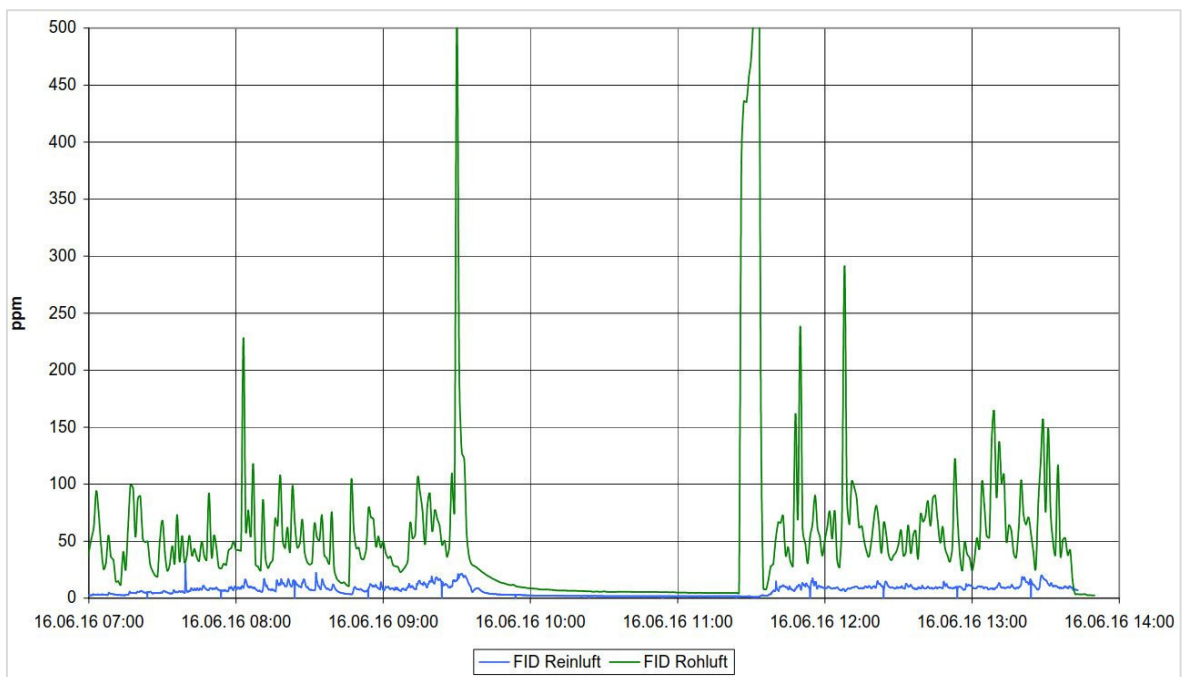
Das mittels Nassabscheider vorgereinigte Rohgas, wird durch einen weiteren Staubfilter zur Beseitigung von groben Reststäuben und Aerosolen geleitet. Das zu bestrahlende Abgas durchläuft den UV-Reaktor mit einer Verweilzeit von wenigen Sekunden. Hier findet die Ozonbildung statt. Des Weiteren werden einzelne VOC durch Fotolyse aufgespalten.

Anschließend durchströmt die mit Ozon angereicherte Luft eine Verweil- bzw. Expositionsstrecke. Im nachgelagerten Restozonvernichter (ROV) wird überschüssiges Ozon abgebaut [31]. Für den Versuch wurden sowohl AK als auch Edelstahlwolle zur Restozonvernichtung eingesetzt und auf ihren Wirkungsgrad hin messtechnisch untersucht.

Zur messtechnischen Betreuung und Überwachung des Pilotversuches wurden verschiedene Messverfahren und -apparaturen wie die FID, UV-Prüfröhrchen zur Ozongehaltbe-

stimmung und Handmesssonden für die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt. Die Bestimmung des TVOC-Gehalts in der Roh- und Reinluft erfolgte unter der Dokumentation des spezifischen Inputmaterials.

Die nachstehende Versuchsauswertung beweist, dass eine zum Teil rückstandslose Abreinigung der Abluft durch UV-Oxidation am Schredder möglich ist. Das Abscheideverhalten der Apparatur wurde unter dem Einsatz verschiedener Niederdruck-UV-Strahler (Hg- und Amalgamstrahler) und den genannten Reststoffvernichtern untersucht. Die im Rohgas gemessene TVOC-Konzentration lag zwischen 5 und 269 mg/m<sup>3</sup> (3 und 168 ppm). Wobei das Reduktionsverhalten beim Einsatz der Edelstahlwolle mit 38 bis 91 % nachweislich geringer ausfiel, als die Gesamtabbaurrate für den TVOC unter der Verwendung von AK (68 bis 96 %). Im Reingas wurden TVOC-Emissionen von 0 bis 51 mg/m<sup>3</sup> (0 bis 32 ppm) nachgewiesen. Die Einzelmessungen der Pilotversuche werden in den folgenden Grafiken dargestellt und weiter interpretiert.



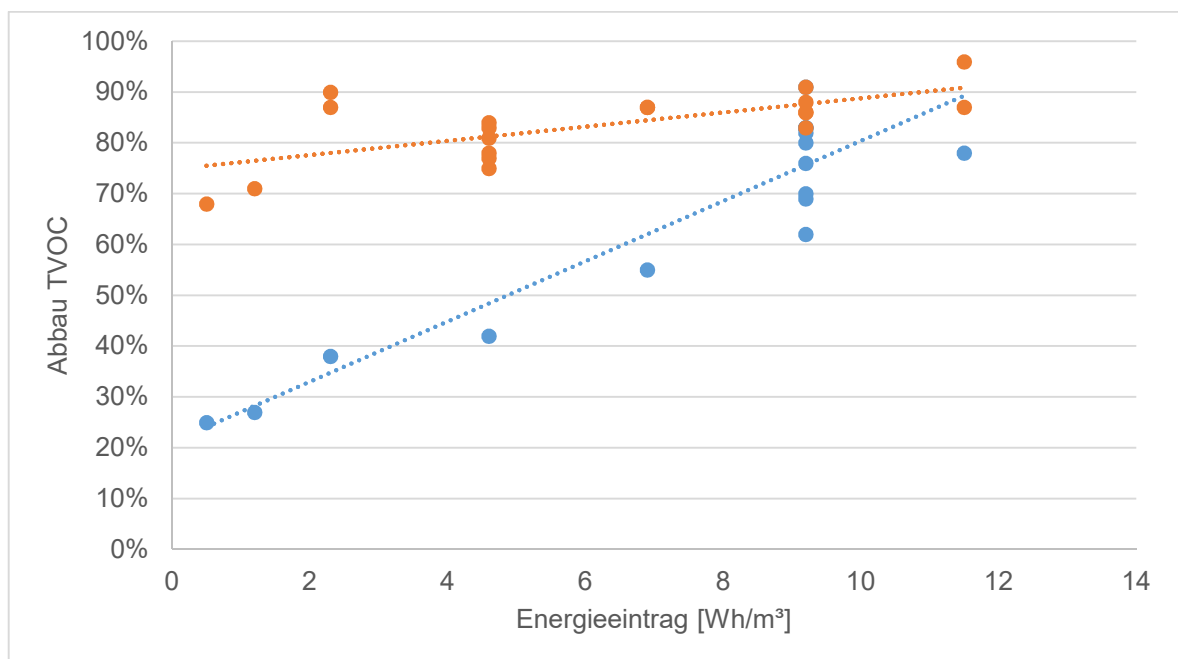
**Abbildung 53: TVOC-Messung Pilotanlage Fotooxidation 2016**

Das erfasste TVOC-Mittel im Rohgas liegt bei ca. 50 ppm. Emissionsspitzen sind größer 500 ppm verzeichnet worden. Abhängig vom Betriebszustand des Schredders, ließen sich auch während des Produktionsbetriebes TVOC-Konzentrationen kleiner 10 ppm im Rohgas nachweisen. Abbildung 53 stellt den Emissionsverlauf einer Tagesmessperiode an der UV-Anlage unter Einsatz der AK im ROV beispielhaft dar. Eine Verbindung zum verarbeiteten

Vormaterial besteht. Zu Beginn der Messperiode wurde SVM produziert. Die Verarbeitung von Karossen ist durch den Anstieg der Messwerte von 11:00 bis 14:00 Uhr deutlich zu erkennen. Im Zeitraum von 09:30 bis 11:00 Uhr lief die Ablufttechnik während eines Produktionsstillstandes am Schredder weiter. Die TVOC-Konzentrationskurve im Rohgas geht gegen Null.

Unterschiedliche Abbaueffekte wurden zwischen den UV-Lampentypen nicht verzeichnet. Unter gleichen Versuchsbedingungen war der TVOC-Abbau für die HG- und Amalgamstrahler nahezu identisch.

Der Einfluss des Energieeintrags durch die UV-Strahlung ist besonders bei den Versuchsabschnitten mit der Edelstahlwolle als ROV erkennbar. Eine Erhöhung der Lichtintensität führt hier zu einer besseren Abbaurrate. Bei der Verwendung von AK im ROV wird der Einfluss des Energieeintrags durch den katalytischen Abbau in Folge der wesentlich größeren inneren Oberfläche überlagert. Aus diesem Grund sind die Abbauraten bereits bei einem niedrigen Energieeintrag von  $4 \text{ Wh/m}^3$  vergleichsweise hoch (ca. 70 %). Die Datenverteilung in Abbildung 54 verdeutlicht den Unterschied in der Abbauentwicklung von der Edelstahlwolle (blau) zur AK (orange) in Abhängigkeit der Lichtintensität. Ein Einfluss der UV-Verweilzeiten auf die TVOC-Reduktion ist unabhängig von der Art des ROV ebenfalls nachweisbar, ändert sich aber bei einer Zeitspanne von vier bis 14 Sekunden für AK nur von 69 auf 87 %.



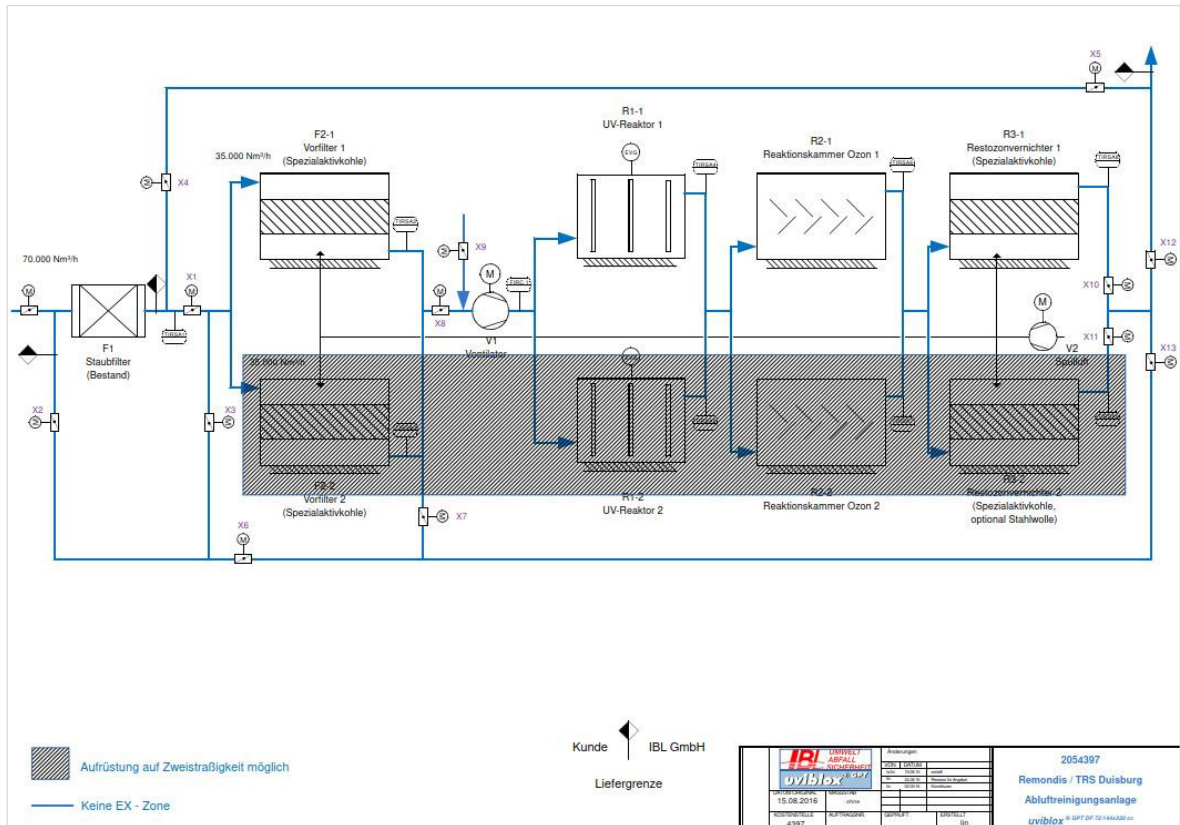
**Abbildung 54: Abbau der TVOC-Konzentration in Abhängigkeit vom Energieeintrag und der ROV-Zusammensetzung**

Sowohl die Edelstahlwolle, als auch die AK erzielten einen positiven Abbaueffekt auf die Restozonmengen nach dem UV-Reaktor. Messbare Restozonkonzentrationen in der Abluft ließen sich nur bei starker Ozonbildung auf Grund hoher Energieeinträge im Reaktor nachweisen. Entgegen der AK besitzt die Edelstahlwolle einen nur sehr geringen adsorptiven Bindungseffekt (deutlich geringere Reaktionsoberfläche) und fungiert im ROV primär als Volumenstrombremse. Bei den gegebenen Betriebsbedingungen erreichte die Stahlwolle einen Abbaugrad von lediglich 25 %. Dieses Ergebnis korrespondiert mit der oben dokumentierten minderen Gesamtabbauleistung der TVOC unter Verwendung der Edelstahlwolle.

Die verfahrenstechnische Kombination von Absorption und Adsorption in Form der direkten Fotooxidation mit ROV funktioniert für die TVOC-Kompilation an Schredderanlagen. Abbauraten von 70 bis 96 % sind so unter den klassischen Betriebsbedingungen der Abgasreinigung möglich. Auf Basis der erzielten Forschungsergebnisse setzt die Firma IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH auf nachfolgende Produktentwicklung (siehe Abbildung 55).

Die in Abbildung 55 systematisch dargestellte Abluftreinigungstechnik ist für niedrige Schadstoffkonzentrationen (bis  $280 \text{ mg/m}^3$ ) in der staub- und aerosolbereinigten Prozessluft und einem TVOC-Grenzwert von kleiner  $50 \text{ mg/Nm}^3$  in der Reinluft ausgelegt.





**Abbildung 55: Direkte Fotooxidation mit Glättungsstufe und ROV**  
**IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH ©**

Diese direkte Fotooxidationsanlage ist für einen Gesamtvolumenstrom von 35.000 m³/h projektiert, kann aber durch einen zweiten Strang auf die doppelte Prozessluftmenge erweitert werden. Das System ist modular in Reihe geschaltet. Der Volumenstrom wird durch die betriebsseitig installierte Staubfilterstufe (F1) in den AK-Vorfilter (F2-1) gesaugt. Die Adsorptions- und Desorptionsprozesse an der AK erreichen eine Vergleichmäßigung der Konzentrationsschwankungen in der Rohluft. Der Abbau des TVOC im vorgereinigten Abgas erfolgt im UV-Reaktor (R1-1) und auf der nachgeschalteten Reaktionskammer (R2-1). Überschüssiges Ozon wird in der ROV-Stufe (R3-1) am Ende des Prozesses abgebaut, bevor die gereinigte Luft die Anlage verlässt. Die Stufen F2 und R3 sind mit speziellen Druckluftspüleinheiten ausgestattet, welche der Kumulation von Feinstäuben und der damit verbundenen Verblockung weitgehend vorbeugen.

Eine Rekuperation der Prozesswärme für die Desorption der AK, ist in Anbetracht der Erkenntnisse aus Kapitel 9.2.2.2 wenig effektiv, könnte die Lebensdauer der AK jedoch erhöhen. Im Vergleich zur RTO bietet diese Systemlösung einen entscheidend niedrigeren Energiebedarf, weil die Schadstoffmoleküle gezielt bei der Wellenlänge des absorbierten

Lichts zerlegt werden, die oberhalb ihrer Bindungsenergie liegt. Der Umweg über ein energieintensives Aufheizen von großen Gasmengen, fällt damit aus.

In Kombination mit einer überdimensionierten ROV könnte der Einsatz der Edelstahlwolle trotz der geringeren Effektivität, in Betracht gezogen werden. Der AK-Bedarf wäre dadurch um ein Weiteres und auf weniger als ein Viertel der derzeit propagierten reinen AK-Anwendung des vorhergegangenen Kapitels gesenkt. Eine Evaluation der Mehrkosten ist in diesem Kontext insofern interessant, dass neben der Mengenreduzierung der AK, der energetische Bedarf der Lampen trotz der hohen Energiedichte bei guter Vakuum-UV-Ausbeute, mit 350 W relativ gering ist. Bei der in Abbildung 55 aufgezeigten Anlagengröße, liegt die geforderte Anschlussleistung für die Bestrahlung bei 25 kW. Bei einer Abluftleistung von 70.000 m<sup>3</sup>/h und damit direkt mit der obigen AK-Lösung vergleichbar, liegt der Energiebedarf bei 50 kW in der Grund- und 100 kW in der Vollausrüstung (144 Lampen). In Bezug auf die erforderlichen Grenzwerte des TVOC ist eine Vollausrüstung erstrebenswert.

Das Ziel der Weiterentwicklung von Abgasreinigungstechniken an Schredderanlagen muss sein, die Betriebszustände des Schredders konsequent aufzufangen, die geforderten Abgaswerte unter normalen Betriebsbedingungen einzuhalten und wirtschaftlich zu sein. Druckveränderungen bei hohen Volumenströmen mit stark schwankenden Schadstoffkonzentration aber niedrigem Grundniveau [14], fordern Lösungen, die über die etablierten BVT hinausgehen. Die selektierten Forschungsansätze zeigen, dass im Abluftsegment dieser IED-Anlagen Potentiale stecken, die noch nicht ausgeschöpft sind. Gerade weil die Abgasreinigung keinen positiven monetären Effekt auf den Verarbeitungsprozess an Schreddern besitzt, müssen kurzfristig bezahlbare Lösungen entwickelt werden.

### **9.2.3 Maßnahmen in der Sortiertechnik**

Die folgenden BVT aus dem Bereich der Stoffstromsortierung, decken sich mit dem in Kapitel 3.3.2 gelieferten Anspruch auf die bevorzugte Behandlung solcher Fraktionen und daran gebundenen Randbedingungen, die im Kontext der gegenwärtigen umweltrechtlichen Problemstellung, zukünftig eine noch größere Herausforderung darstellen. Die ausführliche Beschreibung von erprobten Prozessstufen zur Aufbereitung der SSF, ist folglich nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Die Weiterentwicklung der Sortiertechniken im Pre- und Postschreddersegment dient an dieser Stelle primär der Schadensminderung im Zerkleinerungsprozess, der Arbeitsprozesserleichterung in der händischen Sortierung und der Mengenreduktion bei der thermischen Verwertung. Damit betrachten die folgenden Abschnitte sowohl BVT, die seit Jahren in der

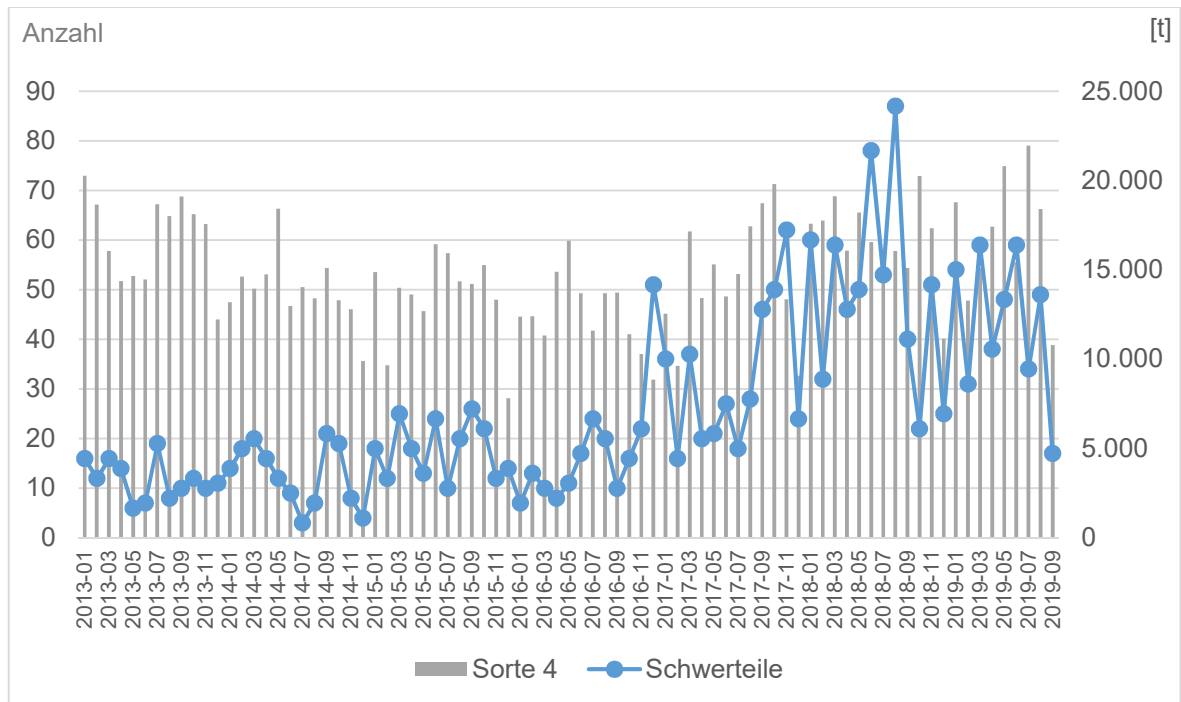
gegenwärtigen Branche etabliert sind, als auch anderen Geschäftsfeldern der Rohstoffwirtschaft entspringen.

Neben emissionstechnischen Verbesserungen, werden durch die folgenden Techniken der Kapitel 9.2.3.1 bis 9.2.3.3 auch positive Effekte in der Prozesskostenentwicklung erzielt.

### **9.2.3.1 Schwerteilerkennung und Hohlkörperdetektion**

Bei räumlich beschränkten Annahme- und Vormateriallagerflächen ist die Befundung und Vorsortierung an massenleistungsfähigen Schreddern, auch prozesstechnisch i.d.R. begrenzt. Sind zum Beginn eines Monats die Eingänge niedrig und eine Vorsortierung durch den Umschlagbagger entsprechend umsetzbar, wird mit zunehmender Eingangsmenge gegen Ende des Kalendermonats, die Störstoffuntersuchung u.a. von Karossen auf Gasdruckbehälter oder versteckte Schwerteile, erschwert. Ein Vorzerreißer kann an dieser Stelle Abhilfe schaffen, ist aber unter Zuhilfenahme der gewonnenen Erkenntnisse aus den BVT 26 und 27 sowie den Anforderungen des Kapitels 8.2.3 zukünftig und trotz der energetischen und aufschlussrelevanten Vorteile im Zerkleinerungsprozess, emissionstechnisch und wirtschaftlich uninteressant.

Eine Untersuchung der Störstoffverteilung an Schreddern der TSR Gruppe ohne Direktentstaubung hat gezeigt, dass der Einfluss von Schwerteilen prozesskostentechnisch ausschlaggebend ist. Durch den fehlenden Anschluss der nachgeschalteten Ablufttechnik an die potentielle Zündquelle (Schreddergehäuse), bleiben kapitale Schäden häufiger aus. An diesen Altanlagen liegt die Gewichtung des wirtschaftlichen Schadens durch Hohlkörper, eher in der Verschleppung dieser in die Sorte 4 und die daraus resultierenden Weigerungskosten im Stahlwerk. Wobei anzumerken ist, dass die geweigerten Stahlwerksfunde häufig auf Grund ihrer Größe, kein Verpuffungspotential im Zerkleinerungsprozess der Mühle darstellen (siehe hierzu auch rückwirkend Kapitel 6.2.10).



**Abbildung 56: Erfassung von Schwerteilereignissen an einem Großschredder im Zeitraum 2013 bis 2019**

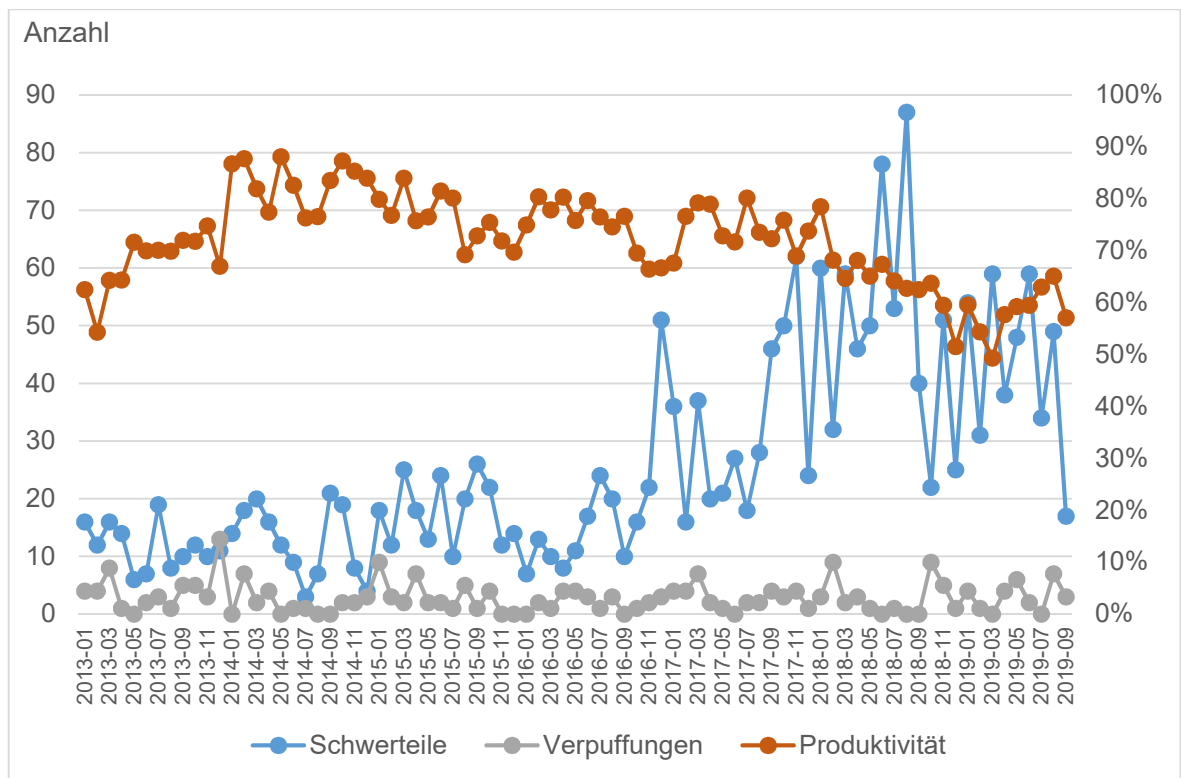
Abbildung 56 zeigt das Aufkommen von Schwerteilereignissen an einer selektierten Schredderanlage der TSR Gruppe in den Jahren 2013 bis September 2019 im Verhältnis zur monatlichen Produktionsmenge (Sorte 4). Die Grenzbereiche der ereignisbasierten Kurve verdeutlicht die Brisanz des Themas bei einer Anlagenneuplanung. So wurden bspw. im August 2018 87 Schwerteilereignisse bei einer Produktionsmenge von 21.202 t des besagten Monats verzeichnet. Trotz der relativ großen Schwankungsbreite, lässt sich ein kontinuierlicher Anstieg der Schwerteilereignisse unabhängig der Produktionsmengenentwicklung verzeichnen. Insgesamt wurden im ausgewerteten Zeitraum 2.092 Schwerteile aufgezeichnet, ein Schwerteil pro 910 t im Mittel, wobei sich die Anzahl der Schwerteile pro 1.000 t ab dem Jahr 2017 im Mittel verdoppelt hat (Tendenz steigend).

Setzt man die in Kapitel 8.2.1.2 dieser Arbeit dargestellten Verpuffungsereignisse der Referenzanlage in das Verhältnis zu ihren Schwerteilereignissen und leitet über die dokumentierten Ausfallzeiten die Produktivität ab, entsteht die folgende grafische Darstellung in Abbildung 57.

Liegt die Produktivität der Schredderanlagen in der Mitte des Jahres 2014 noch zwischen 80 und 90 %, fällt sie mit den zunehmenden Schwerteilereignissen ab dem Jahr 2015 weiter ab. Die Produktivität verhält sich umgekehrt proportional zu der Anzahl an Schadereignissen. Gerade in den Jahren 2018 und 2019 verzeichnet die Produktivität Werte weit unterhalb von 70 %, was auf schwerwiegende Schäden als Folge diverser Schwerteileinträge in

den Rotorraum des Schredders, zurückzuführen ist. Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Verpuffungen liegt 90 % unterhalb der Schwerteilereignisse.

Die Zahlen verdeutlichen, dass die umweltschutzrechtlichen Anreize des BREF und der TA Luft, nicht zwangsläufig deckungsgleich mit den operativen Entwicklungsschwerpunkten der IED-Anlagenbetreiber sind. Verpuffungen sind aus ökonomischen (unplanmäßige Ausfälle und IRW-Kosten), als auch emissionstechnischen Gründen ein wichtiges Thema. Für sich alleinstehend jedoch, decken sie nur einen Einzelnen von vielen Entwicklungsfeldern an Schreddern ab. Verwertbare Vorschläge des BREF zu geeigneten BVT in diesem Segment, sind nicht verzeichnet, obwohl der Effekt von unplanmäßigen Ausfällen, gleich welcher Art, umwelttechnischen Einfluss nimmt.



**Abbildung 57: Darstellung der Produktivitätseinbußen durch Verpuffungs- und Schwerteilereignisse**

Außer der visuellen Erfassung im Rahmen der mechanischen Vorsortierung, hat sich bisher kein valides Detektionsmittel von Schwerteilen vor dem Zerkleinerungsprozess etabliert. Lösungen zur automatisierten Erkennung und Ausschleusung von Schwerteilen aus dem Stoffstrom existieren lediglich für den eigentlichen Schredderprozess. Eine akustische Detektion ermöglicht hier bspw. das automatisierte Öffnen der Auswurfür am Schreddergehäuse und ersetzt damit teilweise den Anlagenbediener.

Grundsätzlich gilt es jedoch den Störstoff vor dem Zerkleinerungsprozess auszuschleusen. Auf Grund der heterogenen Zusammensetzung des Inputmaterials und der relativ hohen Bandbelegung, fällt der Einsatz von geeigneten Bilderkennungssystemen zur Detektion von Schwerteilen, aber auch Hohlkörpern im Vormaterialzuführstrom als stationäre Lösung aus.

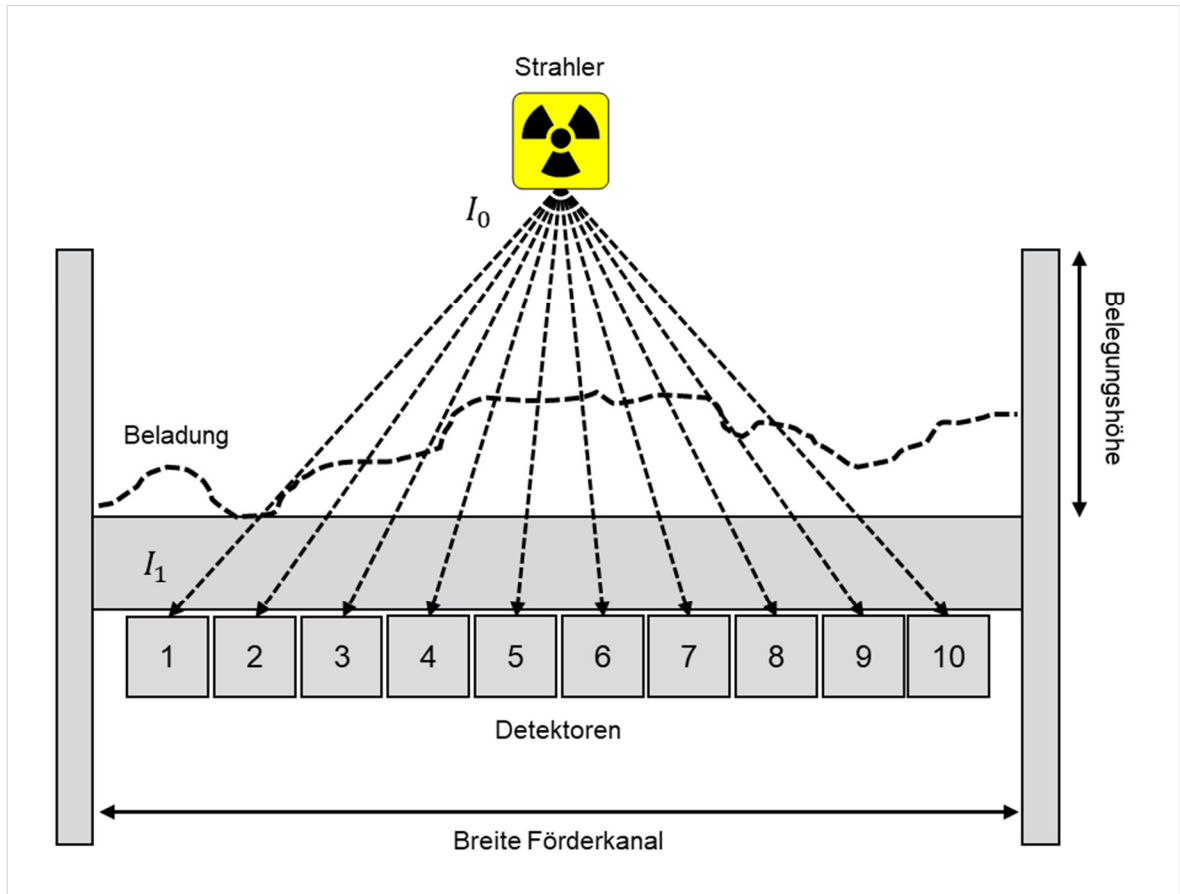
In Anbetracht dieser Problemstellung, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma RGI Industriemessgeräte GmbH über die Jahre 2018 und 2019 ein Verfahren zur Schwerteilerkennung im Zuführstrom des Schredders, im Probetrieb entwickelt. Des Weiteren sind davon unabhängige Untersuchungen zur optischen und gravimetrischen Hohlkörperdetektion im Anlieferungsprozesses durchgeführt worden, welche zum aktuellen Zeitpunkt der Verschriftlichung noch unter Verschluss stehen (Stand 17. Dezember 2019).

Die Schwerteilerkennung an Schredderanlagen bedient sich der radiometrischen Dickenmessung gekoppelt mit einer Bildverarbeitung und einem Motion-Detection-Algorithmus. Die zur Dickenmessung üblicherweise benutzte Transmissionsmesstechnik beruht auf der massenabhängigen Schwächung eines emittierten Röntgen- oder  $\gamma$ -Strahls beim Durchdringen eines Prüfkörpers. Der am Schredder verarbeitete, teilweise sehr heterogene Materialstrom wird direkt, während der Plattenbandbeschickung, auf seine Materialstärke hin untersucht. Streng genommen wird bei diesem Verfahren nicht die Dicke des Materials, sondern die Flächenmasse, also die Masse pro Fläche [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] des durchdrungenen Materials ermittelt. Dieser Ansatz funktioniert unter der Annahme, dass die Dichte des durchleuchteten Materials konstant ist [64].

Bei dieser speziellen Abwandlung der radiometrischen Bandwaage für den Schreddereinsatz, wird eine Strahlenquelle (Cäsium-137 oder Co-60-Isotop) oberhalb des Plattenbandes installiert. Auf der Unterseite des Gutförderers ist eine Detektoren- bzw. Sondenleiste zur Messung der das Messgut durchdringenden Strahlung eingebaut [65].

Über den Abgleich der Strahlungsintensität in der Umgebung eines stark absorbierenden Körpers, mit dessen Absorptionskoeffizienten, kann vereinfacht auf dessen Dicke zurückgeschossen werden (Lambert-Beer'sches Gesetz). Im Anwendungsfall des Schredders ergibt sich das Maß für die Dicke des Messkörpers aus der Beladungsmenge und/oder -dichte des Plattenbandes mit dem heterogenen Stahl-/Schrottgemisch.

Abbildung 58 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau des ersten Systemteils der Schwerteilerkennung am Schredder.



**Abbildung 58: Prinzipskizze Schwerteilerkennung am Plattenband des Schredders  
(Gebrauchsmuster DE 297 19 600 U1) [64]**

In der Prinzipskizze erfolgt ein Vergleich zwischen der ursprünglichen Strahlungsintensität ( $I_0$ ) zu der Gemessenen ( $I_1$ ). Wobei anzumerken ist, dass das System nicht alleine eine Veränderung in der Impulsrate misst, sondern die Bandbelegung über eine geometrische Komponente in die Erkennungsfunktion einbindet. Die Beladung des Plattenbandes ist zu keinem Zeitpunkt der Messung über die Gesamtbreite des Förderkanals identisch. Eine geringe Impulsrate allein reicht nicht aus, um auf ein potentielles Schwerteil zu schließen. Mehrere dünnwandige Bleche können in ihrer Gesamtheit bspw. ebenso eine hohe Absorptionsrate erzeugen, wie ein hochdichtes, dickwandiges Schwerteil. Aus diesem Grund evaluiert die Erkennungssoftware neben der Impulsrate die Veränderung der Durchdringungstiefe über die Zeit. In Rückkopplung mit der Bandgeschwindigkeit wird eine geometrische Information über Form und Lage des Störobjektes ausgegeben (siehe auch Abbildung 60). Der folgende Auszug aus der RGI-Software (Abbildung 59) stellt die Veränderung der Impulsrate in Verbindung mit der geometrischen Information bei einer normalen Bandbelegung und einer Alarmmeldung, in Folge der radiometrischen Schwerteildetektion gegenüber.

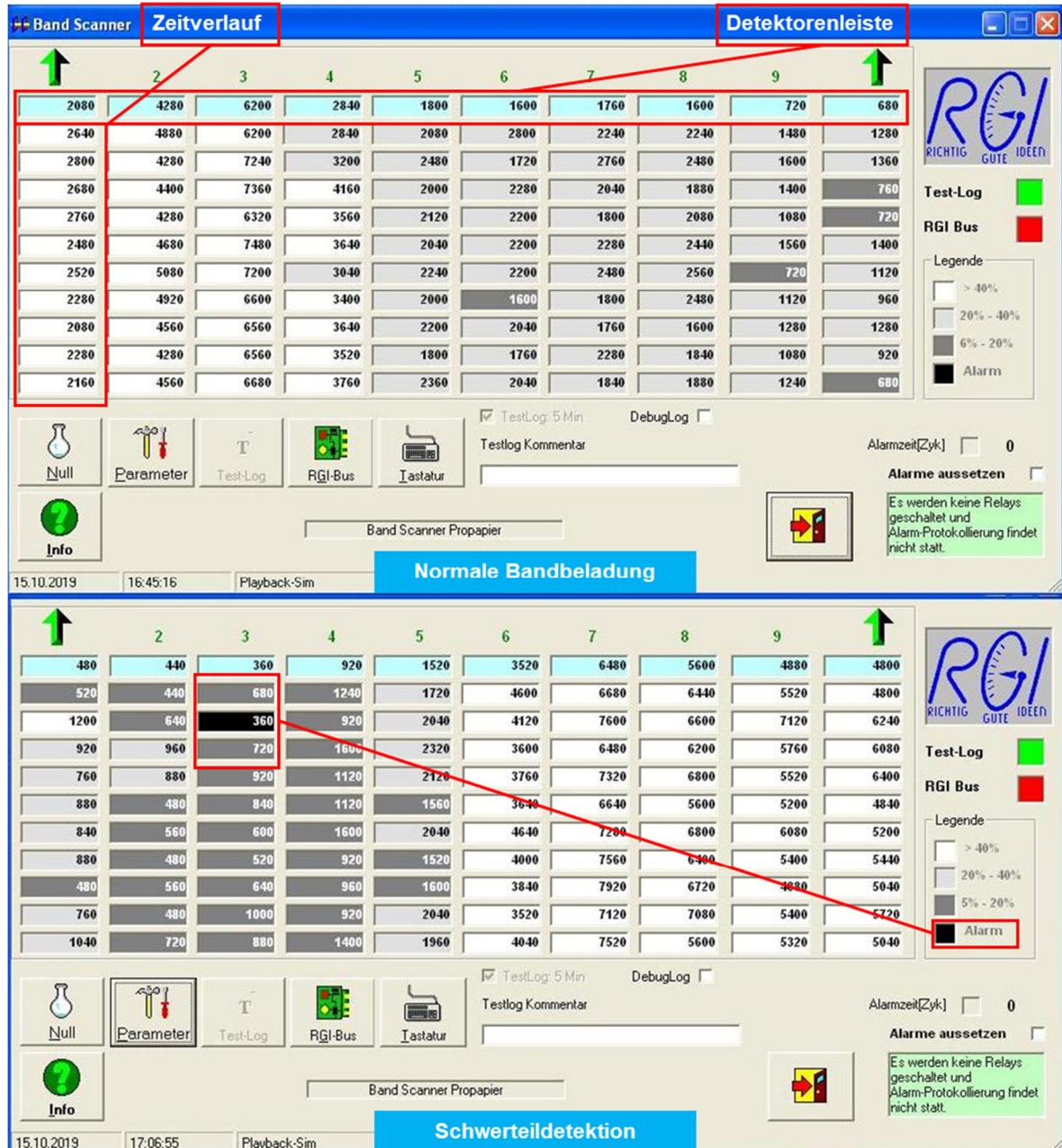
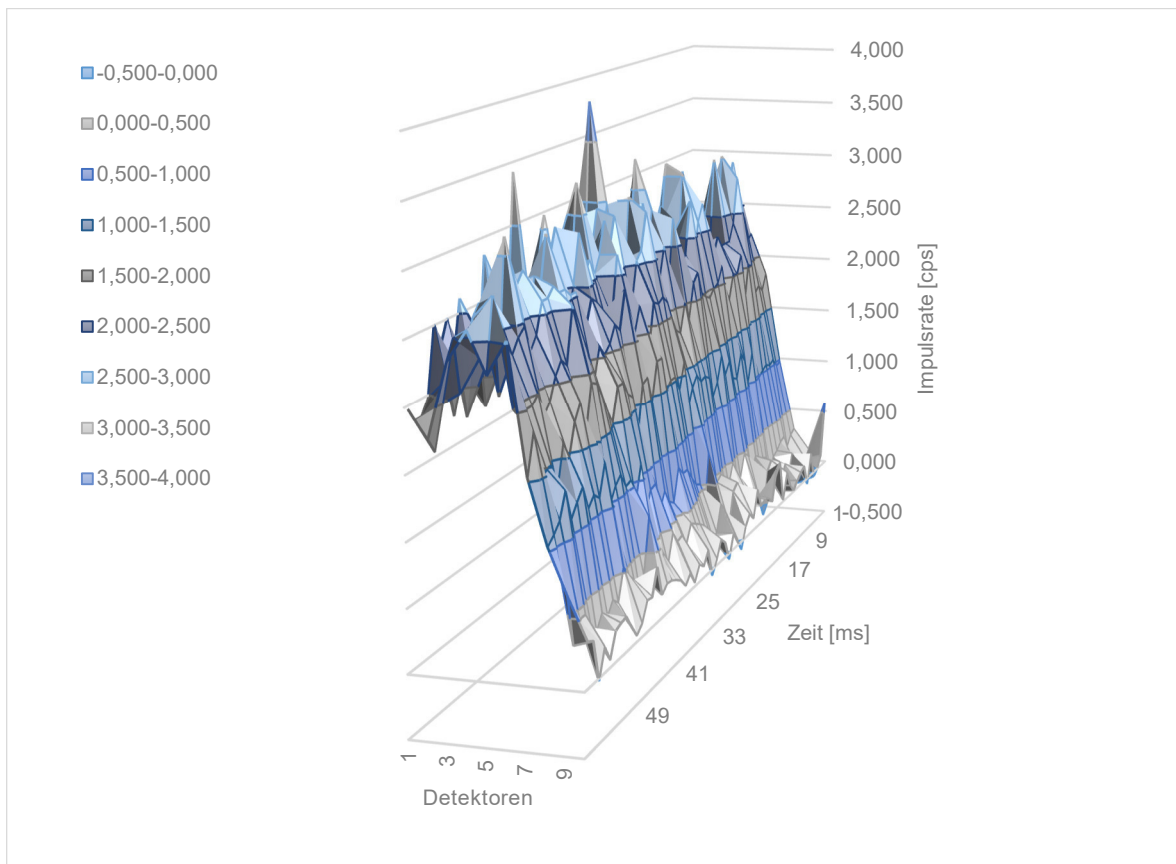


Abbildung 59: Darstellung der Messwerte in der Auswertesoftware der RGI Messtechnik GmbH ©

In der RGI-Software werden die einzelnen Messwerte der Detektoren in einer Taktung von 25 Millisekunden erfasst. Damit ergeben sich bei dieser, aus zehn Detektoren (Detektorenleiste) bestehenden Anwendung, 400 Messwerte je Sekunde. Im oberen Bereich der Abbildung 59 ist eine normale Belegung des Plattenbandes aufgezeigt. Die weiß hinterlegten Felder kennzeichnen eine Durchdringungsrate des Materials größer 40 %. Im unteren Bildabschnitt ist zu erkennen, dass die Detektoren 6 bis 10 eine nur geringe Absorption verzeichnen. Hier ist das Plattenband nur teilweise belegt. Bei einer Impulsratenminimierung



größer 95 % meldet das System einen Alarm. Im Anwendungsfall befindet sich das Schwerteil im Feldbereich des dritten Detektors. Der Schwellwert für die Alarmgebung ist individuell an den verarbeiteten Materialinput anzupassen und basiert auf der Sammlung von Referenzwerten während des Betriebes der Anlage. Infolge der Datenerhebung gilt es die Schwellwerte so zu definieren, dass die Fehlalarmrate praxistauglich bleibt. Durch den Anstieg der Impulsrate vor und nach dem Alarmwert, lässt sich die Geometrie des Schwerteils ableiten, bzw. eingrenzen. Abbildung 60 stellt ein ähnliches Messszenario zu dem vorangegangenen Referenzbeispiel grafisch dar.



**Abbildung 60: Reversiert logarithmische Darstellung der Bandbelegung**

**RGI Messtechnik GmbH ©**

Das Plattenband ist auch hier nur einseitig belegt. Der Spitzenwert wird auf dem Messfeld des dritten Detektors erfasst.

Belegt ein Schwerteil darüber hinaus mehrere Detektionsfelder, kann über die Veränderung in der Zellrate dargestellt werden, wo und in welcher Ausrichtung zum Materialfluss sich dieses befindet. Eine Verifikation der Geometrie und Lage des detektierten Schwerteils ist gerade in der systemischen Lernphase, zu Beginn der Anlageninbetriebnahme von beson-

derer Relevanz. Hierfür müssen sowohl die detektierten, als auch nicht erfassten Schwertereignisse zeitlich protokolliert werden. Weiter ist förderlich, schadensrelevante Fremdkörper nach dem Zerkleinerungsprozess auszuschleusen, zu vermessen und zu verwiegen.

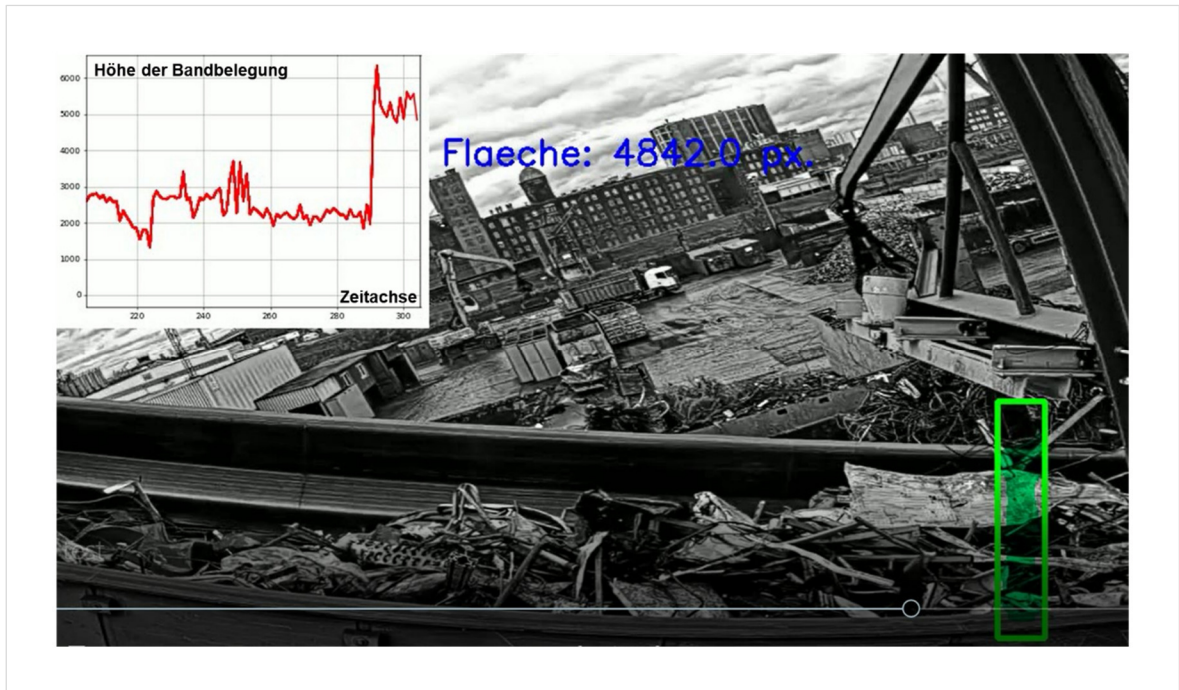
Neben dem sehr hohen zeitlichen Aufwand in der Datenevaluation, ergeben sich eine Reihe von betrieblichen und technischen Herausforderungen durch den Einsatz des genannten Teilsystems im scharfen Produktionsbetrieb. Die Auswahl der geeigneten Strahlungsenergie (Halbwertsschicht) unter Einhaltung der Strahlenschutzverordnung („ALARA-Prinzip“) und eine robuste Bauweise, sind nur einige Aspekte, die im Wirkungsbereich des Schrottrecyclings zu beachten sind [65].

Die Schwankungen in der Materialzusammensetzung in Form heterogener Inhaltsstoffe haben einen entscheidenden Einfluss auf die Durchdringungsrate. Das System erkennt alleine nicht, welcher Inputstrom verarbeitet wird. Eine stoffstrombasierte Schwellwertanpassung muss damit systemunabhängig erfolgen. Die Höhe der Bandbelegung ist ebenfalls nur über eine externe Informationsschnittstelle generierbar.

Weil sich der einer Dickenmessung zugrundeliegende Strahlungsmesswert aus der Summe der im Messintervall vom Detektor registrierten Strahlungsquanten ergibt, spielen Förderbandstillstände und -geschwindigkeit ebenfalls eine entscheidende Rolle in der Messfehlervermeidung. Eine Verknüpfung der Messeinheit mit den Bewegungsparametern des Förderers ist entsprechend erforderlich.

Für die Lösung der genannten Entwicklungsfelder, ist der erste Systemteil der Schwerteilerkennung um eine optische Bilderkennung erweitert und mit der PLT des Schredders verknüpft worden.

Die optische Erkennung bewertet die Bandbelegung im Bereich der radiometrischen Schwerteilerkennung. Abbildung 61 zeigt einen Bildausschnitt aus dem Testbetrieb der optischen Detektion. Über die Abfrage und logische Verarbeitung der Bandgeschwindigkeit, prozentualen Bandbelegung, Vormaterialspezifikation (aus der PLT) und der Impulsrate, erkennt das System automatisch, welcher Schwellwert anzusetzen ist, wann das Band steht (Einstellen des Detektionssignals) und wie nachhaltig der Detektionsquotient auf Grund der Bewegungsgeschwindigkeit tatsächlich ist (Qualität der geometrischen Information, statistischer Fehler der Zählratenmessung).



**Abbildung 61: Testauszug der optischen Bandbelegungsdetektion am Plattenband**

Die Erkennungsrate von Schwerteilen liegt bei der gekoppelten Systemausführung und je nach Inputmaterial, zwischen 50 und 87 %.

Durch die Installation einer Schwerteilerkennung reduzieren sich die Standzeiten und IRW-Kosten am Großschredder entscheidend. Eine effiziente Produktion (siehe auch Kapitel 8.3.1.3) ist unter dem Blickwinkel des ökologischen Fußabdrucks erstrebenswert. Jede Maßnahme, die zu einer Verringerung der außerplanmäßigen Stillstände führt, ist ökologisch wertvoll. Ein Ansatz, der sich mit den Ausführungen zum Abfall- und Stoffstrommanagement sowie dem Energieeffizienzplan aus dem UMS der Kapitel 8.2.1.2 und 8.2.1.3 deckt.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes verfolgt die TSR die Vision einer vollautomatisierten Systemlösung, die sowohl als neuronales Netz ausgebildet ist, als auch ein vereinfachtes Ausschleusen der Schwerteile aus dem Beschickungsprozess ermöglicht. In Verbindung mit den Erkenntnissen aus der Hohlkörperdetektionsstudie, lassen sich langfristig weitere Programmmerkmale für die Störstoffdetektion etablieren. Damit ist die Kombination der einzelnen Anwendungen aus umweltrechtlichen Gesichtspunkten heraus, eine echte Alternative zum Vorzerreißer, der trotz seiner Vorzüge in der Stoffstromagglomeration, immer noch eine unkontrollierbare Emissionsquelle im Schredderprozess darstellt.

Da für die vorstehend beschriebene technische Innovation derzeit seitens der TSR noch die Einreichung einer Schutzrechtsanmeldung geprüft wird, sind die vorstehenden Informationen bis zur Veröffentlichung dieser Arbeit unbedingt als vertraulich zu behandeln.

### 9.2.3.2 Sensorgestützte Sortierung der Sorte 4

In Anbetracht der strengen umweltrechtlichen Auflagen (u.a. Luftreinhaltung) für den bemannten Sortierstand und der zusätzlich greifenden Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) bzw. DGUV Regel 114-602, ist zukünftig davon auszugehen, dass das manuelle Klauben von Feststoffströmen am Schredder, zunehmend erschwert und mit höherem monetären Aufwand verbunden sein wird. Auf Grund der relativ geringen aussortierbaren Mengen pro Zeiteinheit, ist die Klaubung als Massenströmsortierverfahren besonders in der Stahlschrottfraktion eher unwirtschaftlich und primär für die Einhaltung der Qualitätsanforderungen der Stahlwerke eingesetzt [12] [66]. Obwohl der Verlust von Cu-Fe-Ankern in der Sorte 4 darüber hinaus Erlösverluste in der SSF bedeutet. Hinzu kommt, dass auf Basis prozesskostentechnischer Anreize und schwankender Eingangsmengen, Schichtmodelle präferiert werden, die mit der kurzfristigen Verfügbarkeit von Fremdpersonal kollidieren. Im Zuge dieser Herausforderungen, werden in der Schredderschrottlinie perspektivisch autonome Sortierlösungen angestrebt, die eine konstante Sortierleistung bei maximaler Verfügbarkeit und konstanter Sortierleistung, gemäß den internen sowie externen Qualitätsanforderungen liefern.

Die Firma ZenRobotics Ltd. aus Finnland entwickelt hocheffiziente Sortierroboter für die Abfallwirtschaft. In einer gemeinsamen Feldstudie mit der TSR aus dem Jahre 2019, wurde die u.a. im Baumischabfallsegment etablierte Heavy Picker Technology, für den Anwendungsfall der Sorte 4- bzw. E40-Sortierung getestet.

Die Heavy Picker Ausführung ist für schwere und voluminöse Abfallströme entwickelt und das weltweit erste Robotik Sortiersystem für die positive und negative Sortierung in diesem Segment. Als prozessintegrative Insellösung verfügt sie über die Fähigkeit mehrere Abfallströme und unterschiedliche Objekte am selben Ort, durch die Kombination aus Sensoreinheit, Steuerungssoftware und Roboterarm, zu separieren. Das System kann pro Roboter-sortiereinheit bis zu vier verschiedene Fraktionen bei einer maximalen Sortierleistung von 2.000 bis 2.300 Objekten kleiner 30 kg in einer Stunde und bis zu einer Reinheit von 98 % sortieren [67] [68]. Die Sortierleistung ist für den Sorte 4-Massenstrom damit nicht nur völlig ausreichend, sondern übertrifft im Dauerbetrieb die Leistungsfähigkeit des Sortierpersonals. Der prinzipielle Aufbau der besagten Technik findet sich in Abbildung 62.

## ZenRobotics Heavy Picker (HP)

HP wird zur Gewinnung wertvoller Rohstoffe aus dem Abfall verwendet - mit Hilfe von Robotern und intelligenter Technologie

### (1) Sortierband

Roboter passen die Bandgeschwindigkeit automatisch an

### (2) HP-Sensoreinheit

Beinhaltet mehrere, fortschrittliche Sensoren (Sensor Fusion)

### (3) ZenbrAI in Steuerungs-Software

In separatem, klimatisiertem Schaltschrank

### (4) Roboter-Arme und Smart Gripper (Greifer)

Bis zu 4.600 Zugriffe/h pro HP2+-Einheit

### (5) Auswurfschächte

Bis zu 6 Schächte pro Roboter-Arm

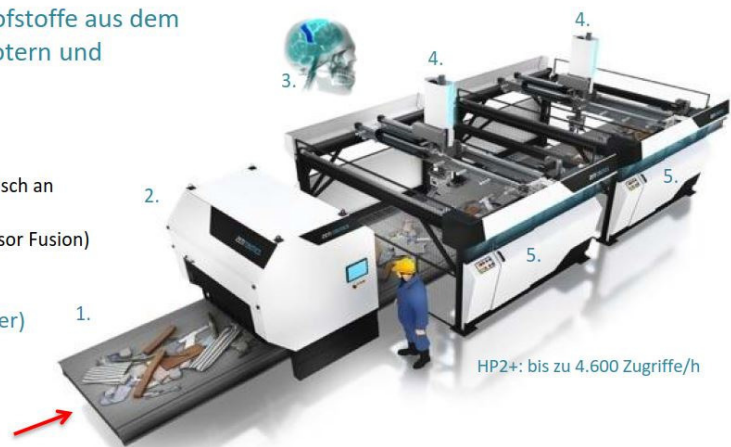


Abbildung 62: Heavy Picker Anwendung ZenRobotics Ltd. ©

Das Sortiergut wird der hocheffizienten optischen Sensoreinheit zugeführt. Die Stoffstrom- bzw. Fremdkörpererkennung erfolgt über hochauflösende RGB-Kameras, ein Nahinfrarotspektrometer, einen Mehrspulenmetalldetektor und einen 3-D Laserscan. Für den gegenwärtigen Anwendungsfall ist der Metalldetektor nur wenig relevant. Die erfassten Bild-daten werden an die zentrale Prozesseinheit übermittelt und von einer lernfähigen Software aus dem Hause ZenRobotics Ltd. ausgewertet. Informationen über Objektgrenzen, Form, Lage, Materialart, Gewicht, Bewegungsgeschwindigkeiten und Greiferposition etc. werden abgestimmt und der Arm aktiv angesteuert (zeitoptimierter Zugriff und hocheffiziente Bunkerzuordnung).

Eine Bilanz- und Performancemessung ist in Form von

- Betriebs- und Leistungsdaten (Durchsatz, Zugriffe pro Stunde, OEE etc.),
- der Abfallzusammensetzung (Analyse pro Arm und Bunker auf Stunden- und Monatsbasis sowie Analyse der stofflichen Eingangszusammensetzung) und
- einer onlinefähigen Datenschnittstelle

über ein Auswertesystem gegeben und deckt sich mit dem Anspruch an die zukunftsweisende KPI-Datenerhebung an Schreddern (Kapitel 9.2.4) [67].

Die viertägige TSR Machbarkeitsstudie selbst erfolgte mit dem Ziel der Negativsortierung von Cu-Fe-Ankern, Langteilen und Störstoffen (organische Rückstände) aus der klassischen Sorte 4-Fraktion von Autoschreddern (siehe rückwirkend auch Abbildung 5). Neben der leistungstechnischen Bewertung, sollte ein generelles Verständnis über die Funktionsweise dieser sensorgestützten Sortierung vermittelt werden, um den Einsatz einer solchen Technologie im Schredderschrottreycling bewerten zu können. Die Vorgehensweise und Testergebnisse der Studie finden sich in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels.

Die Versuchsdurchführung für die Sorte 4-Sortierung erfolgte in drei Phasen:

1. Das Training und Überprüfen als statistische Auswertung der Erkennungsfähigkeit der verschiedenen Fraktionen, gemessen in der Rückgewinnungsrate [%] und dem Reinheitsgrad [%] handverlesener Materialproben,
2. die Funktionsprüfung als Bewertung der Greiferperformance im Rahmen monochargierter Probeladungen aus dem Schredderbetrieb (positive Zugriffsrate in [%]) und
3. die Demonstration der Sortierleistung in Bezug auf die präferierte Rückgewinnungsgröße (Cu-Fe-Anker) in der Sorte 4-Mischfraktion.

Der aus drei Sortierrobotern bestehenden Versuchsanlage wurden insgesamt 3.619 kg Probenmaterial zur Verfügung gestellt. Die Verteilung der Materialproben wird durch Tabelle 20 aufgezeigt.

**Tabelle 20: Materialprobenselektion für die Sensorsortierung**

Nr.	Material	Gewicht [kg]	Trainingsobjekte
1	Sorte 4 (E40)	720	200
2	Cu-Fe-Anker (Meatballs)	570	200
3	Langteile und Übergrößen	409	100
4	Störstoffe (Organik, Dreck)	299	150
5	Sorte 4-Mischfraktion	1621	
Summe		<b>3619</b>	<b>650</b>

Die gelieferte Sorte 4 ist als Lagermaterial mit oxidativen Verunreinigungen ausgeliefert worden, um die Detektionsfähigkeit der Sortieranlage an ihre Grenzen zu führen. Als repräsentatives Gebrauchsmuster und Richtwert über die Verteilung der klaubfähigen Fraktionen in der E40, wurde eine größere Charge der Mischfraktion (1.612 kg) aus der Schredderanlage mitgeliefert und im Zuge der Demonstrationsphase hochkonditioniert und anteilsweise prozessiert.

Zunächst jedoch sind aus den vorsortierten Fraktionen Nr. 1 bis 4 Trainings- und Testmuster selektiert und während der aufgezählten Phasen 1 und 2 mehrfach durch die Anlage gefahren worden. Die Ergebnisse aus der Anlernphase sind in der Tabelle 21 und der Tabelle 22 zusammengestellt.

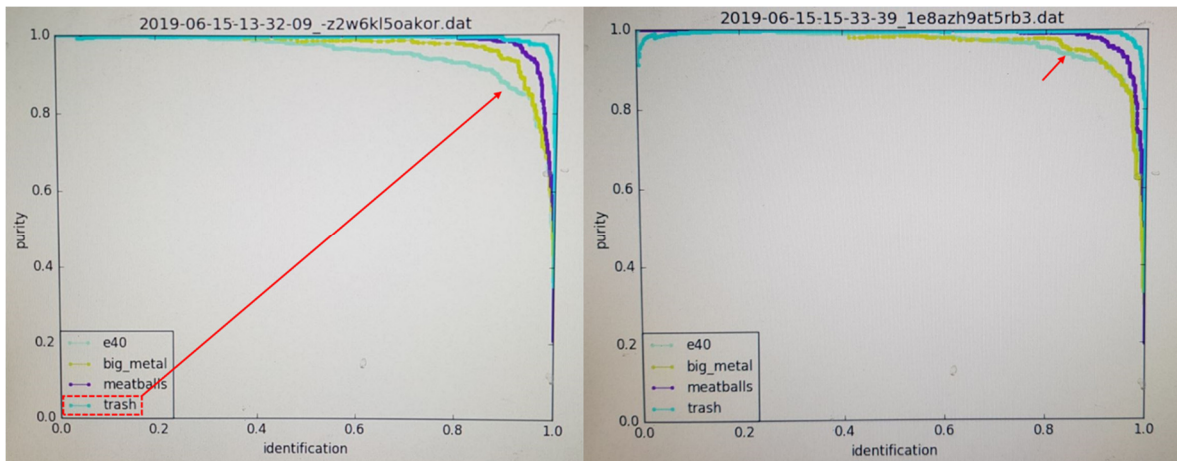
**Tabelle 21: Ergebnisauswertung der Erkennungsphase in der Sensorsortierung**

Nr.	Testobjekte	Korrekte Erkennung	Rückgewinnungsrate [%]	Reinheitsgrad [%]	Kontamination [%]
1	77	77	100	100	0
2	49	47	95,92	96,65	3,35
3	29	26	89,66	89,29	10,71
4	55	47	85,45	80,49	19,51

Die in Tabelle 20 aufgeführten Trainingsobjekte decken sich nicht mit den Testobjekten der Fraktionen 1 bis 4 aus den Folgetabellen. Im Trainingsmodus sammelt das System Bilddaten, um zu verstehen, welche Parameter die einzelnen Fraktionen definieren. Dabei wirkt sich die Intensität der Trainingsphase positiv auf die Erkennungsrate im Testbetrieb aus. Je höher die Anzahl der bekannten Variablen, desto präziser die Materialzuordnung und Zugriffsteuerung (Abbildung 63).

In der Testphase werden gesonderte Objekte als Referenzen der Unterfraktionen ausgewählt. Die Erkennungssoftware sieht die spezifischen Materialproben das erste Mal und entscheidet ohne den Anlagenprogrammierer eigenständig, welcher Fraktion oder Kategorie die Objekte zugeordnet werden. Auf Grund der hohen Priorisierung im Sortierprozess am Schredder, wurden Cu-Fe-Anker mehrfach aufgelegt und getestet.

In Abbildung 63 ist der Effekt vom ersten zum zweiten Testlauf der Versuchsreihe dargestellt und lässt sich besonders gut für die Fraktion 4, als „trash“ gekennzeichnet, nachweisen. Ein weiterer Trainingslauf zwischen der ersten und zweiten Testphase, führte zu einer erhöhten Rückgewinnungsrate im Detektionsmodus des Roboters.



**Abbildung 63: Veränderung der Rückgewinnungsrate in Folge des erhöhten Objekttrainings**  
 ZenRobotics Ltd. ©

Der durch Phase 2 des Feldversuches gekennzeichnete Greiferperformancetest lief parallel zum Testbetrieb. Die Ergebnisse aus Tabelle 22 verdeutlichen, dass der Zugriffserfolg für Cu-Fe-Anker und Störstoffe mit über 93 % sehr hoch ist. Organische Stoffe, wie Textilien, Holz und verwobene Kunststoffe werden zu fast einem Drittel weniger oft erfolgreich vom Gummibandförderer heruntergeklaut.

**Tabelle 22: Ergebnisauswertung der Greiferperformance in der Sensorsortierung**

Nr.	Testobjekte	Zugriffsversuche	Erfolgreiche Zugriffe	positive Zugriffsrate [%]
1	77	77	69	89,61
2	49	47	44	93,62
3	29	26	25	96,15
4	55	47	33	70,21

Auf Basis der gesammelten Datensätze lässt sich das System manuell parametrisieren. Neben der präzisen Abstimmung der Zugriffsrate auf Mengendosierung und Bandgeschwindigkeit, erlaubt die Software eine Priorisierung von Einzelfractionen im Selektionsprozess. Eine Produkteigenschaft, die besonders für die Aufbereitung unterschiedlicher Inputfractionen am Schredder relevant ist. Die Zusammensetzung der E40 aus Weißer Ware verzeichnet i.d.R. einen höheren Anteil an Elektromotoren, als das konventionelle SVM oder Nagelschrott. Die Verwendung stoffstrombasierter „Kochrezepturen“ ist folglich positiv zu bewerten, deutet aber auch darauf hin, dass mit der Einrichtung einer solchen Anlage im Realbetrieb, ein erhöhter Aufwand verbunden ist.



Für die dritte Phase der Feldstudie wurde die Anlage mit der gelieferten Sorte 4-Mischfraktion (Nr. 5) beschickt und mit zusätzlichen Cu-Fe-Ankern konditioniert. Im Demonstrationsmodus erfolgte die Negativsortierung auf Cu-Fe-Anker, Langteile und Störstoffe. Die Beschickung der Anlage ereignete sich über einen Zeitraum von 20 min, bei einer Dosiermenge von 6 t/h und einer Bandgeschwindigkeit von 0,49 m/s. Im Gesamten wurden 1.739 kg der Demonstrationsfraktion über den Teststand gefahren.

**Tabelle 23: Ergebnisse der Demonstrationsphase in der Sensorsortierung**

Nr.	Gesamtgewicht [kg]	Reinheitsgrad [%]	Verunreinigungen [%]
2	140	45,00	55,00
3	90	94,44	5,56
4	30	66,66	33,34

Die erhöhte Fehlerdetektionsrate bei den Cu-Fe-Ankern ist auf den erhöhten Rostanteil der E40 und die Priorisierung in den Systemeinstellungen zurückzuführen. Die Verunreinigungen in den anderen Fraktionen (5,56 und 33,34 %) ergaben sich ebenfalls aus Fehlwürfen stark verrosteter Schredderschrottkomponenten. Für einen Realbetrieb am Schredder ist diese Übersortierung nicht negativ zu bewerten.

Im zweiten Abschnitt der Demonstrationsphase wurde ein einzelner Roboter auf seine Greifgeschwindigkeit getestet. In einer Monocharge aus 200 Cu-Fe-Ankern erreichte der Heavy Picker eine Sortierleistung von hochgerechnet 1.500 Zugriffen in der Stunde. Von den 103 Zugriffsversuchen waren 97,09 % erfolgreich. Für die Anwendung im Downstream des Schredders sind die ermittelten Leistungskennzahlen völlig ausreichend.

Allerdings ergeben sich aus den ermittelten Größen und Erkenntnissen eine Reihe von Anforderungen, die bei einer inlinegebundenen Anwendung am Schredder zu berücksichtigen sind. Die folgende Liste fasst die wesentlichen Eckpunkte für die Weiterentwicklung bzw. Integration des Heavy Pickers an Schredderanlagen stickpunktartig zusammen:

1. Vereinzelung des Aufgabeguts [66],
2. keine Ortsveränderung nach der Sensoreinheit,
3. hohe visuelle Unterschiede zwischen den Fraktionen,
4. stoffstromspezifische Kochrezepte,
5. zweite Sicherheit durch manuellen Sortierstand,
6. Dimensionierung und
7. Genehmigungslage.

In Bestandsanlagen liegt der Sorte 4-Stoffstrom i.d.R. nicht vereinzelt, sondern in einer kegelförmigen Transportschichtung vor. Verdeckte Störstoffe detektiert der Heavy Picker so nicht. Für die erfolgreiche Nutzung der Systemlösung im Schredder-Downstream, muss das Material zerstreut werden. Breitere Transportbänder (1.500 mm) und eine Materialpufferstation als Bunkerlösung sind denkbare Ansätze, ideale Voraussetzungen für die Roboteranwendung zu schaffen. Aus der Bunkerlösung heraus, würde sich des Weiteren die Möglichkeit einer externen Beschickung des Systems, für Fehlwürfe oder weitere Sortierfraktionen aus der SSF-Linie, ergeben. Im autarken Automatikmodus können so kernsortenunabhängige Fraktionen in einer zusätzlichen Schicht sortiert werden.

Eine Bewegung in Form der Ortsveränderung von Fraktionsobjekten nach der Sensoreinheit, führt zu Fehlgriffen, weil der Arm selbst nur ausführendes Organ und an die Befehle der Rechneinheit gebunden ist. Aus gegebenem Anlass ist die Oberflächenstruktur des Förderbandes entsprechend anzupassen. Ein Durchhängen des Fördergurtes ist ebenso nicht zulässig.

Um Fehlgriffe für die in Nr. 4 des Feldtests gelisteten Textilien und Drecknester zu optimieren, ist eine konstruktive Änderung der Greifereinheit möglich.

Reichen die geschilderten Maßnahmen für eine Monoschicht nicht aus, und Objekte werden verdeckt, kann eine Umschlagstufe dafür sorgen, dass das Material weiter aufgeschlossen wird. In dem Fall erfordert der Verfahrensschritt eine weitere Sensoreinheit nach der Stufe. Entsprechende Mehrkosten sind in einer Anlagenneuplanung zu berücksichtigen.

Die visuellen Grenzbereiche der Einzelobjekte sind für den Erfolg des Heavy Pickers in der Schredderschrottlinie entscheidend. Neben der Vereinzlung der Komponenten sind Form und Farbe dieser maßgeblich [66]. Im Vergleich zur Studie, sind rostende Merkmale bei einer neu produzierten E40, mit Ausnahme von MV-Schrotten oder MBA, entscheidend geringer und dürften den Sortierprozess weniger stark beeinflussen. Die Anwendung ist auf Grund der geringen Parameteranforderungen in der Detektion für Hohlkörper geeignet. Eine Erweiterung der Sensoreinheit auf wertstoffliche bzw. metallische Fraktionsbestandteile ist denkbar.

Auf Grund der Fülle an stoffstromspezifischen Merkmalen jedoch, bedarf das System einer ausreichend langen Vorlaufzeit in der Trainingsphase. Die Installation der Robotersortierung muss im Testcenter vorbereitet werden oder als Inselsystem vor der Inbetriebnahme erfolgen. Die Inbetriebnahme selbst ist zunächst eine Anlaufphase, in der der Rein-

heitsgrad der Sortierung nicht den absoluten Potentialwerten entspricht. Durch die Verwendung einer intelligenten Steuerung jedoch, lernt das System exponentiell, sodass der Sortiererfolg mit jedem Zugriff erhöht wird.

Systemausfälle und Fehlgriffe sollten über einen nachgeschalteten, händisch besetzten, aber wesentlich kleineren Sortierstand abgefangen werden. Dieser Umstand entbindet zwar nicht von den genannten rechtlichen und versicherungstechnischen Anforderungen, ermöglicht aber eine Reduzierung in den Betriebs- und Anschaffungskosten. Das Einsparpotential gegenüber einer rein manuellen Sortierung ist für jeden Anwendungsfall im Einzelnen zu bestimmen. Dadurch, dass für die Sensorsortierung weder Ablufttechnik und ArbStättV relevant sind und Sortierpersonal in der Zukunft weniger leicht einzusetzen ist, kommt dieser Systemlösung eine nachhaltige Bedeutung in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen zu.

Die verfahrenstechnische Integration des Heavy Pickers stellt infrastrukturell, als auch genehmigungsrechtlich eine Herausforderung dar. Für Betriebe mit einer Durchsatzleistung von mehr als 80 t/h werden drei Picker in Linie benötigt. Mit den avisierten vorgeschalteten Puffer- und Transporteinheiten nimmt die Sortierlinie bis zu 40 m und mehr ein.

In Bezug auf die Bestandgenehmigung einer Schredderanlage ist davon auszugehen, dass die Erweiterung eine wesentliche Änderung der Betriebseinheit bedeutet. Ist diese an den restlichen Schredderprozess gebunden, kann die automatisierte Sensorsortierung unwirtschaftlich sein (Kapitel 10.2).

Wichtig zu verstehen ist, dass diese im Rahmen der TSR-Feldstudie untersuchte Sortierlösung nur eine von vielen möglichen Varianten im Anlagenbau ist, die E40-Klaubung in der Zukunft unter umweltrechtlichen Gesichtspunkten sicher und bezahlbar zu machen. Folglich stellt diese BVT keine zwangsläufige Präferenz in der Anlagenplanung der TSR dar, wird aber forschungstechnisch weiter begleitet.

### **9.2.3.3 Dezentrale Aufbereitung von Schredderrückständen**

Die zunehmenden Preissteigerungen in der thermischen Verwertung und Deponierung von Schredderrückständen (siehe Kapitel 11.2), wirken sich positiv auf die Entwicklung und Akzeptanz der PST aus [12]. Der zunehmende Anteil von Kunststoffen im Vormaterial wird diese Entwicklung darüber hinaus bestärken. Branchenteilnehmern, denen keine zentralen,

massenleistungsfähigen Anlagen für die Aufbereitung der SLF in Deutschland zur Verfügung stehen, werden zunehmend mit der Entscheidung konfrontiert, in kleinere, dezentrale PST zu investieren.

Grundsätzlich sind die BVT zur Verbesserung der Wertstoffausbringung und Minderung des Abfallaufkommens an Schredderanlagen hinreichend bekannt und umfangreich erprobt. Die ausführliche Darstellung systemimmanenter Aufbereitungsschritte für Schredderrückstände würde an dieser Stelle den Rahmen der Arbeit sprengen oder in ihrer rudimentären Ausführung den etablierten Prozesslösungen nicht gerecht werden. Folglich liegt der Fokus dieses Unterkapitels in der Vorstellung und Diskussion eines Aufbereitungsverfahrens, welches unter ökonomischen und den neuen umweltschutzrechtlichen Gesichtspunkten, den Minimalansatz bei der betriebsinternen Verarbeitung der SLF darstellt. Dabei handelt es sich um keine Innovation im eigentlichen Sinne der verfahrenstechnischen Weiterentwicklung von Schredderanlagen, sondern um den Versuch einen von Verwertungsquoten gelenkten Prozess (siehe Kapitel 2.3.4), auf die emissionstechnische Seite der Argumentation zu ziehen.

Das neue Leistungsverzeichnis für Schredderanlagen beschreibt die Reduzierung der im Aufbereitungsprozess integrierten bewegten Teile, als positiven emissionstechnischen Effekt. Ein Großteil dieser neuen emissionsmindernden Maßnahmen sind Teil des Abfall- und Stoffstrommanagements und werden unter Kapitel 8.2 dieser Dissertationsschrift ausführlich diskutiert. Eine Reduzierung verfahrenstechnischer Schritte ist in der Aufbereitung immer dann sinnvoll, wenn der verarbeitete Wertstrom ein verhältnismäßig geringes Wertstoffpotential birgt. Für die SLF greift diese Gleichung noch.

Unabhängig der geläufigen Recycling- und Verwertungsquoten, setzt der neue rechtliche Rahmen den Schredderbetreiber insofern vor Herausforderungen, dass in jedem zusätzlichen Aufbereitungs- oder Prozessschritt, eine potentielle Emissionsquelle steckt, die es durch geeignete Maßnahmen zu erfassen gilt (Kapitel 8.2.2).

Ein primäres Ziel der neuen SLF-Aufbereitung steckt damit nicht allein in der bilanzierten Erzeugung einer heizwertarmen Fein- und heizwertreichen Grobfraction, sondern in der Aufbereitung der Outputfraktionen unter umweltschutzrechtlichen Randbedingungen.

Aus dem Lastenheft für Schredderanlage des Kapitels 8.2.3 ergeben sich folgende Anforderungen und Motivationen an bzw. für eine Inlinelösung zur Aufbereitung der SLF an Großschredderanlagen:

- Höhere Wertschöpfungstiefe durch Fraktionierung (Schwer- und Leichtgut),
- aber geringer Umfang der Prozessabläufe in der Wertschöpfung vor Ort,
- Reduzierung der Emissionsquellen,
- Reduzierung der Entsorgungsmengen und –kosten (speziell der thermischen Verwertung),
- optimierte Transportauslastung,
- Einhaltung der Qualitätsanforderungen der Entsorger und
- eine wirtschaftlich tragbare Lösung.

Die gelisteten Randbedingungen wurden im Rahmen diverser Machbarkeitsstudien bei der TSR zwischen den Jahren 2016 und 2019 überprüft. Die folgende Versuchsauswertung stellt einen möglichen Technologieansatz zur dezentralen Aufbereitung der SLF vor, der die Zielkonflikte zwischen den aufgeführten Anforderungen ausgleicht.

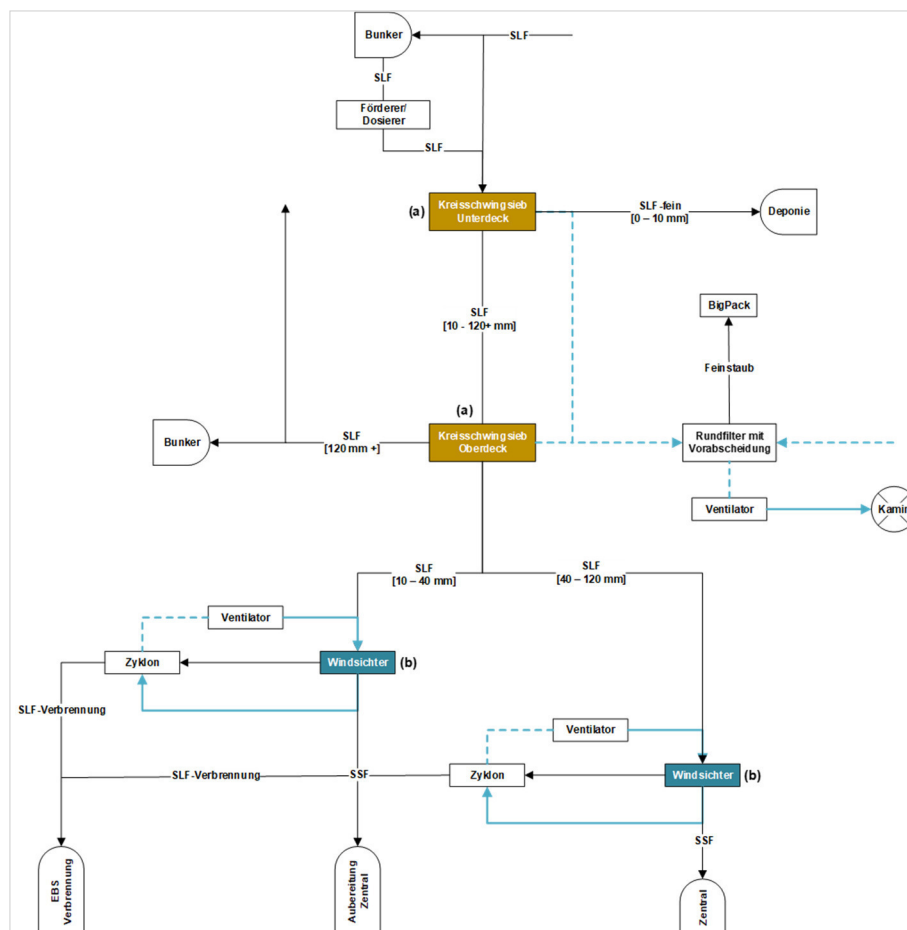
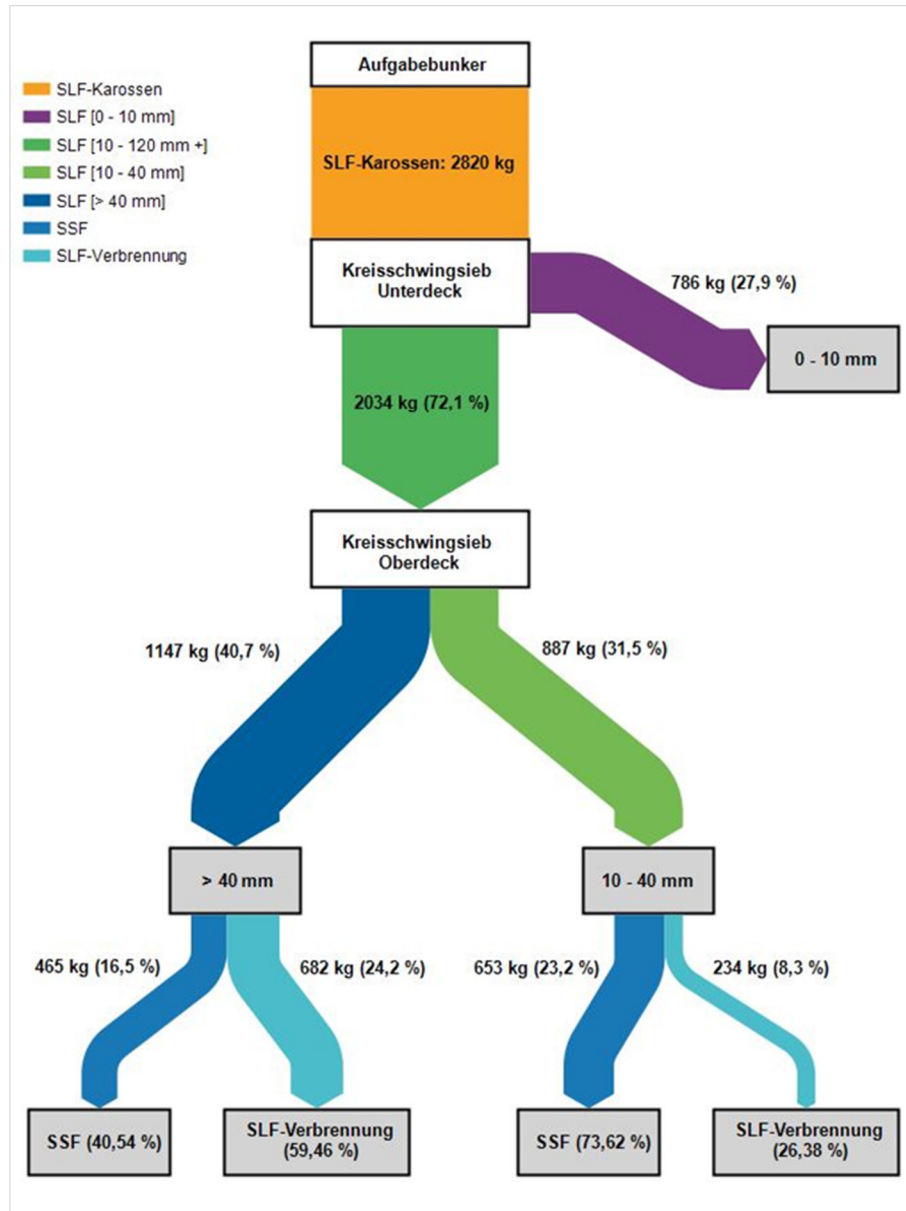


Abbildung 64: Verfahrensfließbilddauszug dezentrale SLF Aufbereitung an Großschreddern

Abbildung 64 stellt den prinzipiellen Ablauf der Versuchsführung in einem systematischen Verfahrensfließbild dar. Die Aufbereitung der beiden SLF-Probeladungen erfolgte in einer trockenmechanischen Prozessstufe aus Siebung (a) und Sichtung (b). Über diese Abfolge der Verfahrensschritte ist eine Fraktionierung der SLF über die beiden Untersorten SLF-fein und –grob hinaus möglich. Aus der SLF-grob entstehen so eine weitere Schwer- und Leichtfraktion, die im Folgenden als SSF und SLF–Verbrennung eingestuft werden.

Die ursprünglich aus Karossen und klassischem SVM gewonnene SLF, wurde direkt nach der Sichterstufe des Schredders ausgeschleust und weder über eine Magnet- noch Wirbelstromscheidung gefahren. Die Probeladungen sollten das gesamte Wertstoffpotential aus Fe- und NE-Metallen ihrer Inputfraktionen abbilden. So wurden der Versuchsanlage auch unaufgeschlossene, mechanisch anspruchsvolle, stark verwobene Fraktionen aus Fe-Drähten, Bautenzügen, Textilien und sonstigen Verunreinigungen/Reststoffen zugeführt. Das Kornband beider Ladungen lag der Rostgröße des Schredders entsprechend zwischen 0 und 250 mm. Insgesamt wurden 6.335 kg der SLF über die Versuchsanlage gefahren.

Die Siebklassierung erfolgte über ein Doppeldeckerkreisschwingsieb mit 3-D-Siebbelag, dynamischen Fingern und Spannweite im Unterdeck der Firma Spaleck GmbH & Co. KG [66]. Der Prozessablauf der Versuchsführung lässt sich beispielhaft an dem Fließbildauszug der Abbildung 64 ableiten. Entgegen der dargestellten Aufbereitungstechnik, wurde die Kornbandabstufung im Versuchsverlauf von 40 auf 120 mm nicht nach oben begrenzt. Im Praxiseinsatz würden die Korngrenzen der Windsichtertechnik entsprechend auf Eins zu Vier ausgelegt und das Überkorn (120 mm +) dem Schredder rückgeführt oder anderweitig verarbeitet werden. Im Feldversuch erfolgte die Dichtentrennung über eine Windsichtereinheit mit eingestellter Luftleistung von 6.400 bis 9.980 m<sup>3</sup>/h (Firma Trenn- und Sortiertechnik GmbH).



**Abbildung 65: Mengenverteilung in der Aufbereitung einer SLF aus Karossen**

Die aus den Probeladungen erzeugte Mengenverteilung ([kg] und [%]) ist über die Sankey-Diagramme der Abbildung 65 und der Abbildung im Anhang D nachzuvollziehen.

Aus den verschiedenen Probeladungen lassen sich unterschiedliche Partikelgrößen- und Stoffstromverteilungen ableiten. Die SLF aus Karossen stellt mit 2.820 kg die massenspezifisch geringere Versuchsmenge dar, führte aber auf Grund der voluminösen Struktur ( $0,22 \text{ t/m}^3$ ) und bei gleicher Drehzahl (700 U/min), zu längeren Verweilzeiten mit geringerem Durchsatz auf dem Siebdeck. Die sehr rieselfähige und folglich siebwillige SLF aus SVM ( $0,46 \text{ t/m}^3$ ) kommt auf einen hochkumulierten Durchsatz von 20 t/h. Ein Umstand, den es bei der technischen Auslegung einer online Siebtrenntechnik zu berücksichtigen gilt.

Der hohe Feinkornanteil in der SLF des SVM von 48,85 % untermauert das hohe Schüttgewicht, wo hingegen die Kornbandverteilung der Karossenfraktion relativ gleichmäßig ist. Das Zahlengerüst der Feinkornverteilung für Karossen und SVM lässt sich an dieser Stelle sehr gut in Verbindung mit den Ergebnissen der Emissionsauswertung aus Kapitel 7.3.1 bringen. Die Mengenverteilung bestätigen, dass der Feinkornanteil (Staubpartikel größer 10 µm) in der heterogenen Karossenfraktion merklich kleiner ist (27,87 %), als beim Mischschrott bzw. dem klassischen SVM.

In Summe wurden ca. 40 % SSF aus der SLF gewonnen und der SLF-Anteil zur thermischen Verwertung auf bis zu 10,10 % reduziert. Zu betonen ist hierbei noch einmal, dass die SLF-Ladung nicht Fe- und NE-bereinigt war. Bei einem direkten Vergleich zur herkömmlichen Kombination aus in Reihe geschaltetem Fe-Überbandmagneten, Siebtrommel und Wirbelstromscheider, sind diese Faktoren zu berücksichtigen. Unbestritten bleibt jedoch, dass bei der herkömmlichen Technik ein Großteil der SSF in der SLF-grob verloren geht und mit ihr erhebliche Wertstoffpotentiale, auch in den Kunststoffen.

Insgesamt beläuft sich der zu verwertende Abfall aus der SLF-Verbrennung und dem Absieb für beide Probeladungen auf ca. 60 %.

Die gewonnenen SSF-Fractionen aus den Siebschnitten 10 bis 40 mm und größer 40 mm, sind im weiteren Verlauf der Feldstudie auf ihre stoffliche Zusammensetzung untersucht worden, um neben den Vorteilen einer verwertungsfreudigen Mengenverteilung, auch eine Aussage über den Wertstoffgehalt der SLF zu erhalten. Für eine aussagekräftige Wertstoffanalyse wurde das Mittelkorn durch die Firma BHS Sonthofen GmbH auf 0 bis 6 mm nachzerkleinert.

Die Zerkleinerung der SLF vor der Klassierstufe ist eine geläufige Technik in der PST-Linie an Schreddern (besserer Aufschluss der SLF, u.U. Einsparen der Nachzerkleinerung), in Anbetracht der emissions- und kostentechnischen Auswirkungen für den gegenwärtigen Systemansatz, jedoch nicht weiter zielführend.

Die Mengenverteilung in der Tabelle 24 und Tabelle 25 verdeutlicht, dass der Fe-Anteil der SSF, in Bezug auf die Gesamtmenge der SLF gerechnet, zwischen 2,94 und 9,14 % liegt. Das Wertstoffpotential für die NE-Fraktion inklusive der ausgezählten Leiterkarten und der VA-Restbestandteile, beläuft sich auf fast 8 % der beprobten Eingangsmenge (Gesamt mengenbezug).



**Tabelle 24: SSF-Wertstoffverteilung in der SLF aus Karossen**

SSF-Karossen	> 40 mm [kg]	> 40 mm [%]	Gesamt- bezug [%]	0 - 6 mm [kg]	0 - 6 mm [%]	Gesamt- bezug [%]
Fe	115	24,69	4,07	73	12,70	2,94
NE	92	19,75	3,26	22	3,83	0,89
VA-Rest	11	2,47	0,41	78	13,57	3,14
Reststoffe	247	53,09	8,75	404	69,91	16,19
Summe	<b>465</b>	<b>100</b>	<b>16,49</b>	<b>579</b>	<b>100</b>	<b>23,16</b>

**Tabelle 25: SSF-Wertstoffverteilung in der SLF aus SVM**

SSF-SVM	> 40 mm [kg]	> 40 mm [%]	Gesamt- bezug [%]	0 - 6 mm [kg]	0 - 6 mm [%]	Gesamt- bezug [%]
Fe	197	43,40	5,61	293	36,01	9,14
NE	81	17,92	2,32	48	5,88	1,49
VA-Rest	32	7,08	0,91	70	8,61	2,19
Reststoffe	143	31,60	4,08	403	49,50	12,56
Summe	<b>454</b>	<b>100</b>	<b>12,92</b>	<b>815</b>	<b>100</b>	<b>25,38</b>

Vergleichswerte aus einer älteren Studie der TSR zur marktgängigen Produktgestaltung der SLF aus den Jahren 2008 bis 2009, weisen eine ähnliche Mengenverteilung für drei unabhängige Schredderanlagen auf (Nr. 1 bis 3 in Tabelle 26). Bei den in Tabelle 26 aufgelisteten Werten ist zu vermerken, dass die Magnetabscheidung für alle Probefractionen vor der Siebstufe eingesetzt wurde. Die Fe-Anteile der SLF fehlen demnach in der aufgezeigten Schwerfraktionsverteilung. Überträgt man die Anteile der Fe-Fractionen aus der Tabelle 24 und Tabelle 25 auf die Mittelwerte der betrachteten Tabelle 26, ergeben sich trotz der unterschiedlichen Siebschnitte, vergleichbare Werte in der Mengenverteilung von der SSF zur SLF-Verbrennung. Diese Ergebnisse rühren u.a. aus der relativ ähnlichen Korngrößenverteilung der SLF (ca. 40 % der SLF-Gesamtmasse liegt in einem Kornband von 10 bis 70 mm), deuten aber auch darauf hin, dass die verarbeiteten Inputströme miteinander stofflich verwandt sind.

Die gemessenen Werte verstehen sich auch an dieser Stelle lediglich als richtungsweisend und erheben keinen Anspruch auf eine empirisch festgelegte Wahrscheinlichkeitsverteilung für das generelle Mengengerüst der konglomerierten Leichtfraktion an Schreddern.

**Tabelle 26: Mengenverteilung in Folge einer SLF-Sichtung aus dem Jahre 2008**

Nr.	SSF	SLF-Verbrennung	SSF	SLF-Verbrennung
	30 - 70 mm [%]	30 - 70 mm [%]	14 - 30 mm [%]	14 - 30 mm [%]
1	44,20	55,80	30,00	70,00
2	63,20	36,80	62,30	37,70
3	60,50	39,50	37,20	62,80
Mittelwert	<b>55,97</b>	<b>44,03</b>	<b>43,17</b>	<b>56,83</b>

Der aktuelle Referenzversuch zeigt allenfalls, dass eine Aufbereitung der SLF über wenige trockenmechanische Klassier- und Sichterstufen im Inlinebetrieb möglich ist. Die Reduzierung der dezentralen Wertschöpfungstiefe durch das Einsparen der Fe- und NE-Separation birgt sowohl energetische, qualitative, als auch durchsatzbegünstigende Potentiale. Gerade bei massenleistungsfähigen Großschredderanlagen über 4.000 PS Antriebsleistung und grober Rostmasche, führen Aufschlussverluste im Zerkleinerungsprozess sehr häufig zu einer Akkumulation von duktilen Fe- und Störstoffnestern im SLF-Strom. Ein zirkuläres Prozessieren dieser Nester führt i.d.R. zu einer Verschleppung in die Sorte 4 und kann ggf. zu Qualitätsabzügen im Stahlwerk führen.

Des Weiteren gilt zu berücksichtigen, dass die Aufbereitungstiefe in der nachgeschalteten Technik nur bis zu einem gewissen Grad mit der Massenleistungsfähigkeit eines Schredders korrespondiert. Bei großen Schredderanlagen ist mit einer Flaschenhalswirkung mechanischer Nachzerkleinerer, Sensorsortierer o.ä. planerisch umzugehen. Gerade in Bezug auf die prognostizierte Mengenentwicklung der SLF, darf dieser Effekt nicht unterschätzt werden. Bei einem Systemausfall sollte die Linie über eine Bypasslösung (Bunker) kompensiert werden. Diese kann dem Vorbild der vorgenannten Sorte 4-Sortierung aus Kapitel 9.2.3.2 entsprechend, auch zur Aufgabe und Aufbereitung von Sonderfraktionen im Offlinebetrieb des Schredders genutzt werden (modularer Aufbau).

Mit der Reduzierung der Verfahrensschritte werden überdies potentielle Emissionsquellen eingedämmt. Bei einer Neustrukturierung des Schredders ergibt sich die Option einer Quellenbündelung diffuser Emissionen. So besteht die Möglichkeit die Siebdeckabsaugung bspw. mit der Magnettrommelentstaubung der Sorte 4-Linie zusammenzulegen (siehe Abbildung 64). Die nachgeschaltete Sichterstufe der SLF funktioniert autark im Aspirationskreislauf und ist damit streng genommen keine Emissionsquelle.

Die Entsorgungsmengenreduzierung zur thermischen Verwertung wirkt sich positiv auf die Lagerbestandsführung (keine Freilagerung, sondern direkte Containerbeschickung), die Umschlaghäufigkeit (Staubentwicklung), Transportmengen und -auslastung sowie den Brandschutz aus. Alle Effekte, die mit den BVT 5 und 14 des BREF unter umwelttechnischen und monetären Gesichtspunkten korrelieren (siehe dazu auch Kapitel 8.2.1.2).

Die prozesstechnischen Vorteile der dezentralen SLF-Aufbereitung lassen sich darüber hinaus mit den Anforderungen der thermischen und stofflichen Verwertung zusammenführen. Eine ausführliche Beschreibung der Qualitätsanforderungen aus der Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (zulässige TOC-Werte und Glühverlust, Schwermetalleintrag (Pb), Bewertung der Bioverfügbarkeit sowie bestimmter Prüfkriterien der Gebirgsmechanik) oder die detaillierte Definition der Annahmekriterien in der Sekundär- bzw. Ersatzbrennstoffverbrennung (Heizwert, Glührückstand und Chlorgehalt), fordert weitestgehend Grundlageninformationen, die in ihrer Gänze den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.

Im Kontext der genannten Verwertungsrouten und hier aufgeführten dezentralen Behandlung der SLF ist lediglich auszuführen, dass die Herausforderungen in der SLF-Entsorgung langfristig für Schredderbetreiber steigen werden.

Die Aufbereitung der SLF wird in Folge des sich wandelnden Inputstroms, zu einer erhöhten Akkumulation von Schwermetallen in der Feinfraktion führen. Der erhöhte Anteil von kritischen Kunststoffbestandteilen (u.a. DecaBDE) in der Schwerfraktion der SLF ist des Weiteren für die stoffliche Verwertung problematisch und ab einer gewissen Grenzwertüberschreitung, auf Grund der Entsorgungsnachweispflicht, für den thermischen Prozess langfristig uninteressant. Magnetische Erzeugnisse aus dem Unterkornband der Feinfraktion (Fe-Sand) finden heute bereits keine Absatzkanäle mehr, sodass zukünftig hochwertigere Verwertungspfade eingeschlagen werden könnten [12].

Im Folgenden werden diesen Themenkomplex abschließend, solche Industrieanlagen und Verfahrensvorschläge genannt, die für die (zentrale) Aufbereitung von Schredderrückständen, den aktuellen Stand der Technik in Deutschland und seinen Anrainerstaaten wiedergeben.

Die VW-SiCon-Technologie ist ein in Deutschland entwickeltes Verfahren und stellt die Grundlage mehrerer industrieller Anlagen in Österreich, Frankreich, Belgien und den Niederlanden dar. Sie wurde ursprünglich für die Aufbereitung der SLF entwickelt und erzeugt trockenmechanisch aufbereitungsfähige Vorprodukte (Rohgranulat, -flusen- und -sand) zur weiteren Veredelung [12].

Das Unternehmen ARN Recycling ist eine über einen Fond subventionierte Einrichtung in den Niederlanden zur trockenmechanischen Aufbereitung (Zerkleinerung, Siebung-, Sichtung und Sortierung) der SLF aus Altkarosserien.

Die Firma SRW metalfloat GmbH in Espenhain hat sich auf eine trockenmechanische Aufbereitung der SLF und SSF mit anschließender Flotationsanlage (Schwinn-Sink-Trennung)

zur Trennung von Reststoffen und Metallen, sowie Aluminium und Schwermetallen spezialisiert. Die Firma INDRA Recycling GmbH aus Hockenheim ist ebenfalls auf die Aufbereitung der SSF mittels Flotation im Mittelkornsegment (größer 20 mm) ausgelegt.

Für die trockenmechanische Aufbereitung u.a. des Unterkorns aus der SSF (Fines) können die Firma Sims M+R GmbH in Bergkamen und perspektivisch die Firma REMINE GmbH in Brandenburg an der Havel genannt werden.

Die Firma Gallo aus Belgien beherrscht an dieser Stelle die gesamte Bandbreite der Schredderrückstandsaufbereitung und gilt als vielzitierte Referenzanlage im europäischen Vergleich.

Der Vollständigkeit halber nennenswerte Verfahren zur Aufbereitung der SLF, sind das Sortec-Verfahren der Firma LSD GmbH und der trockenmechanische SRP-Prozess der Firma Sult GmbH [12].

## **9.2.4 Maßnahmen in der Prozessdigitalisierung**

Die digitale Vernetzung ist ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung der Industrie 4.0 [69]. Im Zuge dessen und in Anlehnung an die in Kapitel 8.3 ausgeführte Vorentwicklungsstufe der autonomen KPI-Datenerhebung an Schredderanlagen, hat sich die TSR zur Aufgabe gemacht, Produktionssysteme im Schrottreycling interaktiv zu gestalten und für eine automatisierte Betriebsführung vorzubereiten.

Auf Grund der Fülle an Maschinen- und Betriebsdaten im betrachteten Produktionssystem (siehe rückwirkend auch Kapitel 3.1 und 3.3.2.2), wird es zunehmend schwieriger eine manuelle PPS (Sukzessivplanungsansatz) an Schreddern praxisnah und so auszuführen, dass die Profitabilität des Unternehmens im mathematischen Sinne maximiert wird [35]. Die Digitalisierung bestehender Prozessabläufe ist ein geläufiger Ansatz, systemintegrierte Produktionseinheiten und Maschinenelemente für den Anwender bedien- und auswertbar zu machen (PLT). Im Rahmen eines systemübergreifenden Digitalisierungsprozesses an Schreddern, besteht die Herausforderung nicht im Umgang mit den herstellergelieferten, teilweise stark veralteten PLT-Systemen, sondern in der Vernetzung dieser Techniken in einem betriebskompatiblen Datenbanksystem [20]. Die Marktresonanz in der durchgeführten Konzeptstudie zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen hat gezeigt, dass derzeit keine ganzheitliche Lösung für die Vernetzung von Maschinen-, Betriebs- und Warenwirtschaftsdaten an Schredderanlagen existiert. In den folgenden Abschnitten wird aufgezeigt, wie eine solche Systemlösung zur automatisierten KPI-Datenerfassung und Auswertung an Schredderanlagen aussehen kann. Die gelieferten Ergebnisse verstehen sich auch als der

in Kapitel 8.3.2 geforderte Lösungsansatz für eine digitale ressourcenschonende Vernetzung stoffstrombasierter Daten und Produktionskennzahlen in einem Informationssystem.

Die folgende Liste stellt die wesentlichen Projektschritte eines zweijährigen Digitalisierungsprozesses an einer Referenzschredderanlage der TSR aus den Jahren 2018 und 2019 vor:

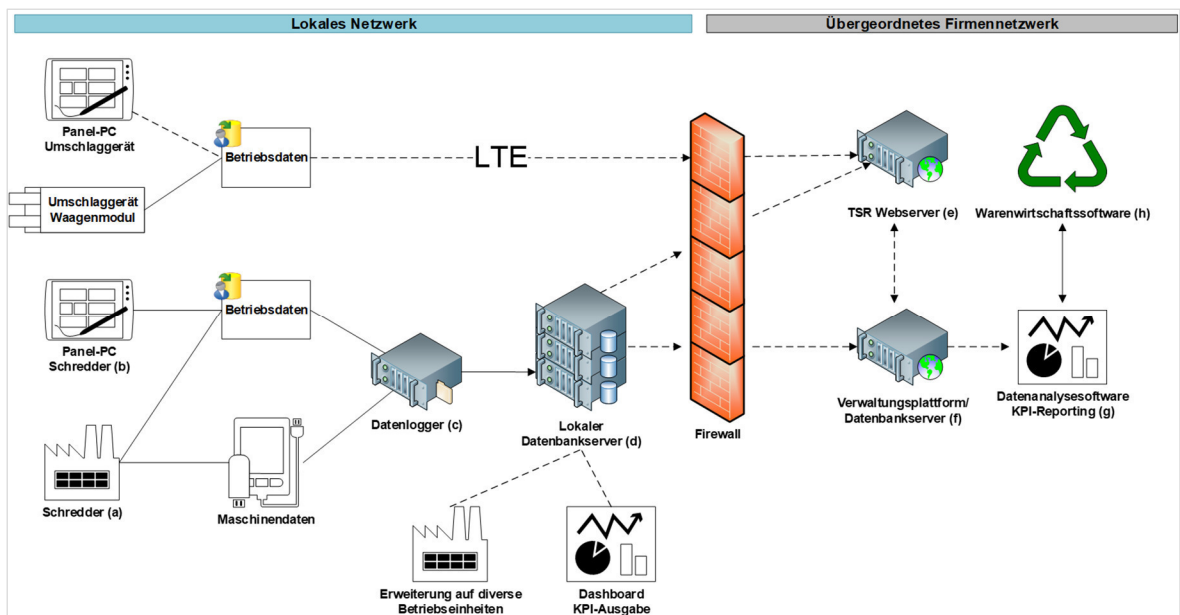
1. Zusammenstellung der bereits existierenden Datenerfassung am Schredder (Auswertung und Erweiterung bestehender PLT-Systeme),
2. Systemabgleich generierter Maschinen- und Prozessdaten mit dem etablierten Schreddertool (Allokation von Entwicklungsfeldern),
3. technische Erweiterung der Schredderanlage und sonstiger Betriebsprozesse entsprechend dem KPI-Standardprotokoll,
4. systemtechnische Einbindung von lokalen Maschinen, Betriebs- und Wiegedaten (Netzwerkinfrastruktur und Datenbankdesign),
5. Schaffung einer Systemschnittstelle zur übergeordneten Warenwirtschaft,
6. Backendprogrammierung für die zentralisierte Stammdatenpflege (Warenwirtschaft, Kosten),
7. Konvertierung des Schreddertools aus der manuellen in eine automatisierte Reportingstruktur (Produktionstagesberichterstattung und Monatsreporting),
8. Einbindung einer Open-Source-Dashboardlösung für die dezentrale dynamische Visualisierung des Produktionsprozesses [70].

Die relevanten Projektschritte verdeutlichen, dass das manuell geführte KPI-Schreddertool Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung der digitalen Prozessgestaltung an Schredderanlagen ist. Eine ausführliche Herleitung zum Aufbau und der Notwendigkeit des Systemwerkzeugs im standortübergreifenden Effizienzvergleich sowie bei der Planung von Großschredderanlagen, findet sich in Kapitel 8.3 dieser Arbeit. Das Tool wurde von Beginn an, aus dem Anspruch einer Systemerweiterung heraus entwickelt und übersteigt in der Kennzahlensammlung die Datengrundlage der bestehenden PLT-Systeme. In den ersten beiden Stufen des Projektverlaufes wurde schnell deutlich, wie rudimentär die Datenverarbeitung an den diversen Generationen der Schredderanlagen immer noch ist und welche Maschinenelemente Programm bzw. Steuerungsinformationen liefern, aber nicht in die Datenauswertung eingebunden sind. Das Anforderungsprofil der Anlagenhersteller an den Maschinendatensatz (siehe rückwirkend auch Tabelle 1) ist vielerorts nicht deckungsgleich mit dem des Betreibers. So wurden im Zuge der technischen Systemanalyse und folglich dritten

Stufe des Digitalisierungsprojektes, gravimetrische Wagenmodule nachgerüstet, zusätzliche Informationsgeber installiert, dezentrale Datenloggereinheiten verbaut und die Programmierung neuer Datenschnittstellen angestoßen.

Die Systemerweiterung und Einbindung sonstiger produktionsrelevanter, aber vom Schredder physisch entkoppelter Prozesse, wie das Materialflussmanagement auf dem Betriebsgelände oder die administrativ gelenkte Warenwirtschaft, stellt den zeitlich und monetär größten Anteil der Prozessdigitalisierung dar.

Die dafür notwendige Netzwerkstruktur aus Datenbanken, Protokollstruktur und Schnittstellenkommunikation, ergibt sich beispielhaft aus der Übersicht in Abbildung 66 und lässt sich für die obigen Projektschritte 4 bis 8 wie folgt zusammenfassen.



**Abbildung 66: Netzwerkarchitektur digitale Prozess- und Datenerfassung am Schredder [49]**

Die vom Schredder (a) generierten Maschinen- und Betriebsdaten werden in eine lokale Zwischenablage (Datenlogger (c)) im Schreddernetzwerk geschrieben. Durch die manuelle Eingabe von Produktionsparametern via Touchpanel-PC (b), werden die maschinengenerierten Prozessgrößen mit weiteren Informationen zu den gewählten Betriebsmodi, dem produzierten Sortenmix und/oder der Verifikation von Stillstandsgründen etc. ergänzt.

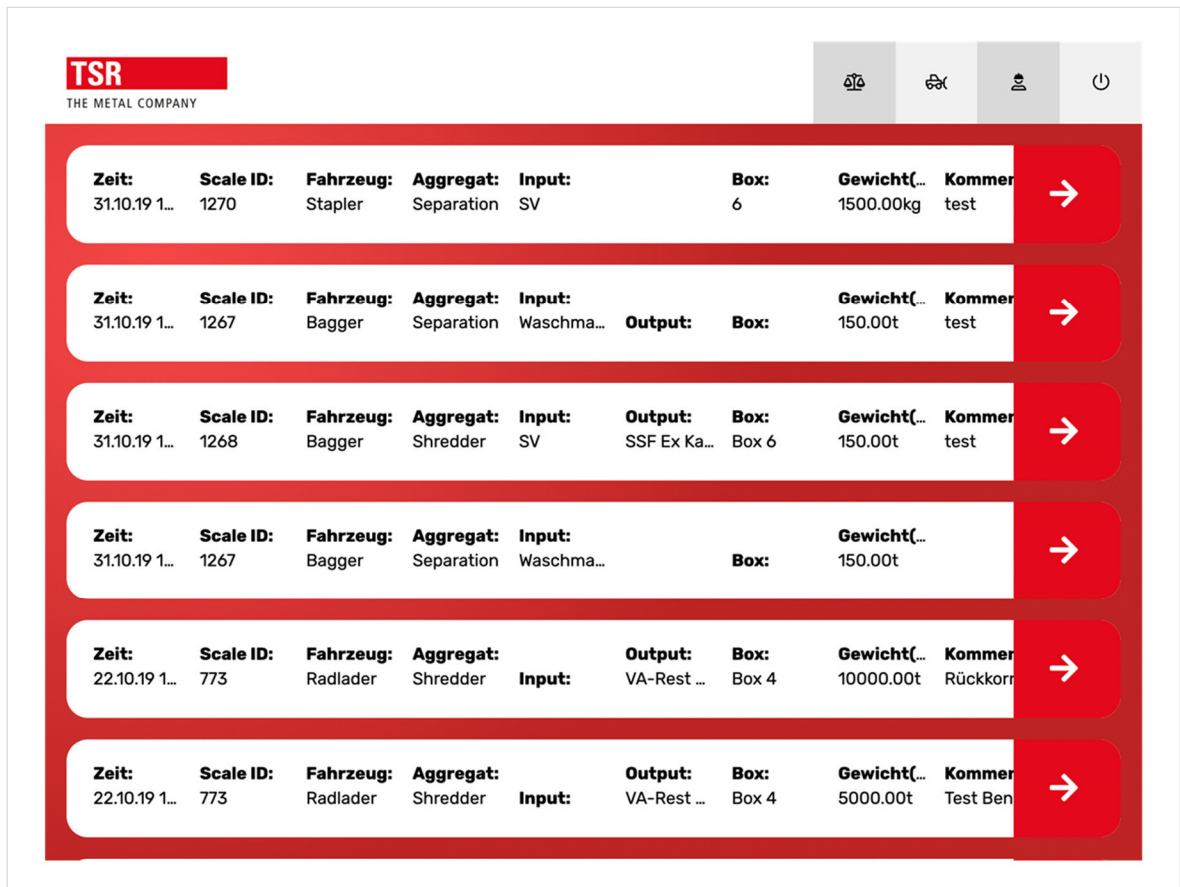
Ein lokaler Datenbanks server (d) übernimmt an dieser Stelle die Datenkollektivierung von diesen und weiteren Zwischenablagen oder Informationsquellen (andere Betriebseinheiten).

Für eine dynamische Visualisierung der Daten ist das lokale SQL-Datenbanksystem insofern hilfreich, dass Redundanzen vermieden werden und die Datenkonsistenz erfüllt bleibt.

Eine zeitnahe statistische Aufbereitung der Produktionsdaten wird für eine aktive Betriebsführung vorausgesetzt [20].

Die Betriebsdatenverarbeitung an mobilen Produktionseinheiten verhält sich äquivalent zur beschriebenen Datenverwaltung des Schredders, mit dem Unterschied, dass diese Daten nicht lokal zwischengelagert, sondern direkt über eine interaktive Webserveranwendung (e) im übergeordneten Firmennetzwerk, abgewickelt werden (LTE-Verbindung).

In der speziell für diesen stoffstrombasierten Anwendungsbereich programmierten Benutzeroberfläche, erfolgt die Zuordnung von Umschlaggerät und Funktionsbereich flexibel und an den Schredderprozess angepasst. Abbildung 67 zeigt einen Auszug aus der von TSR entwickelten Webserveranwendung für die bilanztechnische Erfassung des Produktportfolios am Schredder.



Zeit:	Scale ID:	Fahrzeug:	Aggregat:	Input:	Output:	Box:	Gewicht(...)	Kommer...
31.10.19 1...	1270	Stapler	Separation	SV		6	1500.00kg	test
31.10.19 1...	1267	Bagger	Separation	Waschma...			150.00t	test
31.10.19 1...	1268	Bagger	Shredder	SV	SSF Ex Ka...	Box 6	150.00t	test
31.10.19 1...	1267	Bagger	Separation	Waschma...			150.00t	
22.10.19 1...	773	Radlader	Shredder	Input:	VA-Rest ...	Box 4	10000.00t	Rückkorr...
22.10.19 1...	773	Radlader	Shredder	Input:	VA-Rest ...	Box 4	5000.00t	Test Ben...

Abbildung 67: Auszug der mobilen Wiegedatenerfassung an Schreddern

Die für den mobilen Wiegeprozess relevanten Randparameter (Personalbefähigungen, Sortenkataloge usw.) werden über eine Verwaltungsplattform (f) in einer Backendstruktur

gepflegt. Diese bietet u.a. eine manuelle Fehlerkorrekturfunktion bei lokal geschriebenen Prozessdaten.

Durch die logische Zuordnung relevanter In- und Outputsorten, ist der Wiegeprozess vordefiniert und bildet den individuellen Verfahrensprozess des Schredders ab. Neben der einfachen Erfassung von Mengen und Outputsorten, enthält die Anwendung darüber hinaus eine Verknüpfung zur Lagerlogistik. Über die Lagerboxenzuordnung werden Bilanzinformationen gebildet, die nicht nur für die OEE von Bedeutung sind, sondern für einen Abgleich der LBB und Umbuchungsprozesse im Warenwirtschaftssystem genutzt werden. Eine GPS-Verknüpfung zwischen Umschlaggerät und Lagerbox soll eine saubere Sortentrennung begünstigen und Fehlzuordnungen im Rahmen der Umfuhr des verwogenen Gutes vermeiden. Des Weiteren zielt die tagesaktualisierte Bemessung der Lagerbestände darauf ab, eine kontinuierliche Risikobewertung der bestandsabhängigen Kapitalbindung zu erhalten [41]. Ein Bewertungszyklus, der für Großschredderanlagen mit hoher Mengenbewegung in dieser Frequenz ungewöhnlich ist, aber zeigt, wie präzise die Wertstromerfassung an Schreddern der Zukunft aussehen kann.

Die eigentliche KPI-Kennzahlenerzeugung erfolgt durch die Datenanalysesoftware (g) der Abbildung 66, welche maschinentechnische, betriebliche und kaufmännische Informationen aus dem Warenwirtschaftscontrolling selektiv bündelt. Sie versteht sich als die eigentliche Digitalisierung des angeführten Schreddertools und seiner Reportingstruktur.

Auf Grund der wertstromorientierten Auslegung des Schredderprozesses behält das Warenwirtschaftssystem (h), in dem alle Materialein- und -ausgänge, die LBB, Preise und Kosten geführt werden, die Datenhoheit in der Systemarchitektur [49].

Die beschriebene Datenbankstruktur macht eine stoffstromorientierte Bewertung von Leistungsparametern an der Schredderanlagen erfolgreich und kommt einer ERP-Anwendung sehr nahe. Unter Berücksichtigung der unternehmerischen Geheimhaltungspflichten, können an dieser Stelle weder Quellcodes noch Programmdetails offengelegt werden. Der weitere Verlauf dieses Kapitels wird sich demnach auf die Darstellung von Leistungsmerkmalen und Weiterentwicklungsperspektiven des automatisierten KPI-Prozesses eingrenzen.

Das Technologieprojekt zur Digitalisierung und Vernetzung von produktionsprozessrelevanten Kennzahlen an Schredderanlagen, versteht sich als ein ganzheitlicher Ansatz, der weit über die automatisierte Datenerhebung und Auswertung hinausgeht. Die Herausforderung in diesem Feld liegt vielmehr in der Zusammenführung proprietärer PLT-Systeme aus Maschinentechnik, Produktionscontrolling, Warenwirtschaftsanwendungen und IT-Infrastrukturen, als in der Entwicklung neuer BVT zur Datenerhebung per se.



So verfolgt das Projekt das Ziel, die bereits gelieferten Innovationen zur Abluftnachbehandlung oder Produktionsüberwachung bzw. Sortierung aus den Kapiteln 9.2.2 und 9.2.3 langfristig in PPS einzubinden. Neben der Ist-Analyse des Schredderprozesses auf Grundlage tages-, wochen- und monatsbasierter Berichtsstrukturen, sollen alle potentiellen Informationsgeber dezentral auf dem Datenbankserver erfasst, anschließend selektiert ausgewertet und für einen aktiven Eingriff genutzt werden.

Das operative Potential des KPI-Tools ist dann nicht ausgeschöpft, wenn die aufgezeigten prozesstechnischen Defizite nur erfasst, nicht aber stochastisch ausgewertet und als Prozessoptimierer bzw. Innovationstreiber eingesetzt werden. Eine Rückkopplung der OEE ist für den Entwicklungsprozess am Schredder maßgebend. Das bedeutet ferner, dass die Rolle des KPI-Schreddertools nicht nur in der Prozessüberwachung und Dokumentation liegt, sondern zukünftig eine automatisierte Steuerung der Produktionsabläufe interaktiv über die Anpassung des Zerkleinerungsvorgangs (SDA), Abluft- und Magnettrommeleinstellungen, Sortierstandbelegungen usw. ermöglicht. Über diesen Ansatz lassen sich Informationen zu Umweltauswirkungen der Anlage direkt in den digitalen Schredderprozess einbinden und die Produktions- mit der Emissionsüberwachung (auch Wetterdaten o.ä.) koppeln.

Durch die absolute Vernetzung aller Produktionseinheiten, vor- und nachgeschalteter Prozesse, können Anomalien erkannt und daraus enorme Effizienzsteigerungen sowie Ressourceneinsparungen abgeleitet werden (neuronales Netz) [62]. Das schließt auch ein, dass längst existierende, aber produktionsfremde Systemlösungen vollumfänglich ausgeschöpft werden. So sind heute bereits Lösungen zur mobilen Befundung in die Annahmeverwachung eingebunden. Die mobile Befunder-App der Firma Recy Systems GmbH ermöglicht die direkte Zuordnung von Bildern zur Wiegung, sodass die Daten direkt an das ortsunabhängige Warenwirtschaftssystem gesendet und von dort weiterverarbeitet werden. Die Bilder dienen den Einkäufern als Nachweis gegenüber dem Lieferanten. Insbesondere bei Sortenänderung, Sortenaufteilung, Abzügen und Störstoffbewertung, sind Fotos eine wichtige Datengrundlage in der Kommunikation mit dem Zulieferer. Eine durchgängige digitale Abbildung der Stoffströme erleichtert die Arbeit der administrativen und vertrieblichen Funktionsbereiche und kann für die nicht-monetären Kennzahlen im Produktionsprozess eingesetzt werden.

Drohnenflüge zur Inventarisierung der Bestände helfen die erfassten Produktionsmengen aus dem Schredderprozess zu verifizieren und mit der Warenwirtschaftssoftware abzugleichen. Durch die Aufteilung der Schredderbetriebs in Feldmaschen (Raster), werden Bestandszuordnungen weiter erleichtert. Die Verbindung zu der GPS-gestützten Lagerlogistik

erweitert den Detektionsradius des Materialflussmanagements, optimiert die Transportauslastung (Telemetrie) und dient der Überwachung von Risikobereichen brandschutz- und emissionsgefährdender Stoffe. Die digitale Vernetzung von Administration und Betrieb ist ein weiterer fortschrittlicher Ansatz dieser Forschungsarbeit, den umweltschutzrechtlichen Forderungen zum Abfall- und Stoffstrommanagement (Kapitel 8.2.1.2) nachzukommen.

Die derzeit noch maschinen- und produktionsdatengeprägte Auswertung von Schredderanlagen, wird in der Zukunft auch Wertstoffpotentiale und Veränderungen in der metallurgischen Zusammensetzung, ausgegeben als Qualitätsschwankungen im Produkt, einbinden. Derzeitige Feldversuche bei der TSR zur metallurgischen Onlineanalyse von Outputströmen, sind ein erster Ansatz verwertbare Parameter in die Qualitätsfaktorisierung der OEE (Kapitel 8.3.1.3) einzubringen und eine zahlenbasierte Rückkopplung an die Stoffstromkonditionierung im Schredderinput zu generieren.

Großschredder die keine inlinegebundene SSF-Aufbereitung im Downstream verankert haben und nicht direkt auf die Auswertungsergebnisse der Fraktionen im Batchbetrieb zurückgreifen können, sind auf alternative in situ Analytik angewiesen.

Ferner ermöglichen solche Systeme die Steuerung von nachträglichen Vergütungsoptionen. Welche Rolle die Stoffstromtransparenz auch im Zusammenhang mit der Entwicklung des Vormaterials und den Produkthanforderungen spielt, wird in Kapitel 11.4 dieser Arbeit weiter vertieft.

In der nächsten Entwicklungsstufe des KPI-Schredderstandards steht die digitale Fabrik [20]. Einzelne Produktionseinheiten und Maschinenelemente sollen noch weiter miteinander verknüpft und Fehler- sowie Zustandsmeldung ausgegeben werden. Statusmeldungen zu den Verschleißerscheinungen von Zerkleinerungswerkzeugen und Verschleißplatten im Schreddergehäuse existieren bereits seit Jahren. Die standzeitrelevanten Daten sind jedoch durchsatzgebunden und weit von applikationsbasierten OEE-Meldestrukturen entfernt. Zukünftig besteht der Anspruch auf qualitätsmanagementfundierten Lösungen, die den Schredderprozess über eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) abbilden [20]. Eine numerische Risikobewertung der Produktionsstätte bzw. des gesamten Schrottplatzes, identifiziert Entwicklungsfelder transparent und kann in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen wegweisend sein.

Die Fülle an erzeugten Daten fordert neben einer schredderspezifischen Datenverwaltungsarchitektur, vergleichsweise höhere Speicherkapazitäten und Rechnerleistungen vor Ort und im übergeordneten Firmennetzwerk. Mit der KPI-Schredderprozessdigitalisierung

bewegt sich die TSR in Bereich des Big-Data-Managements, da perspektivisch nicht nur einzelne Betriebseinheiten auf dem Schrottplatz miteinander kommunizieren werden, sondern Unternehmensstandorte zentral in einen Produktionsbenchmark gehen oder Schnittstellen nach außen bereithalten.

In dieser Form könnte sich das umfassende Datamining auch positiv auf die behördliche Berichterstattung auswirken und eine Lösung der Forderungen zur Nachweisführung bedeuten (Kapitel 8.2.1.3). Unter Einhaltung datenschutzrechtlicher Auflagen, könnte die Weitergabe von sicherheits- und umweltschutztechnischen Daten und Nachweisgrenzen in einer adäquaten Reportingstruktur, Auditierungspflichten von IED-Anlagenbetreibern neu auslegen. Das genannte Konzept stellt letztendlich die nächste Stufe eines digitalisierten UMS an Schredderanlagen dar und ist ein Referenzbeispiel dafür, wie die Industrie 4.0 sukzessive Einzug in das Schrottreycling erhält.

### **9.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch Anwendung des Simulationstools**

Die letzte Leistungsphase der in Kapitel 9.2 vorgestellten Konzeptstudie, wird durch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des neuen Schredderkonzepts abgebildet. Die Evaluation der einzelnen Systemvarianten erfolgt in einem klar definierten Bilanzierungsrahmen. In Anlehnung an Kapitel 8.3.3 zur Einführung des Simulationstools, wird die monetäre Risikobewertung des Schredderkonzepts in vier Stufen ausgeführt:

- die Produktionskostenermittlung aller Konzeptvarianten auf Basis der durchgeführten Ausschreibungen und Recherchen,
- die spezifische Kalkulation der Einzelmodule unter Einbindung der Betriebskennzahlen aus dem KPI-Schreddertool (gemittelte Kostenschlüssel der Verbraucher in EUR pro Mengen-/Zeit- oder Leistungseinheit),
- die Kosten-/Nutzenbetrachtung der Konzeptvarianten im Kontext des festgeschriebenen Bilanzierungsrahmens und
- die stoffstrombasierte Erlösbetrachtung der Einzelmodule für eine Verwendung dieser in der Bestandstechnik.

Die Zusammenführung aller Erkenntnisse aus den Leistungsphasen 1 bis 3 in der folgenden ökonomischen Evaluation des Schredderkonzepts, bietet die Möglichkeiten der Systemdiversifikation. Die standortunabhängige Auswertung der vorgestellten Systemkomponenten

im Kontext der Weiterentwicklung von Schredderanlagen unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen, unterstützt dabei, unterschiedliche Ausführungen eines Schredders abzubilden. Das Schredderdesign ist damit kein starres Standortkonzept, sondern firmenweit anwendbar. Die Flexibilität in der Parametrisierung des Planungstools ermöglicht die Kalkulation diverser Investitionsszenarien, unter markt- und kostenspezifischen Bedingungen.

Die Plankennzahlen aus Anlagen- und Verbrauchskosten resultieren im Wesentlichen aus den in Tabelle 27 aufgelisteten Parametern und der modulspezifischen Investitionsbandbreite. Die Eingabe der individuellen Investitions- und Betriebskennzahlen erfolgt intuitiv in der Eingabemaske des Schreddertools.

**Tabelle 27: Betriebsdatenerfassung im Planungstool**

Betriebsdaten	Einheit
Arbeitstage pro Jahr/Monat	[d]
Produktionsstunden ideal pro Tag (Sollstunden)	[h/d]
Durchsatz Anlage (Input)	[t/h]
Platzbedarf Anlage	[m <sup>2</sup> ]
Ziel Verfügbarkeitsfaktor (Anlageneffizienz)	[%]
Betriebszeit (Schichtzeit) pro Tag/Monat/Jahr	[h]
Produktionsstunden pro Tag/Monat/Jahr	[h]
Stillstandszeiten pro Tag/Monat/Jahr	[h]
Personalbedarf modul- und gerätespezifisch	-

Entgegen der, auf die Bedürfnisse des Anwenders angepassten, simplifizierten Eingabefunktion, sind die Stammdaten im Backend des Tools relativ umfangreich. Der eingebaute Algorithmus führt die aggregierten Referenzdaten des KPI-Kennzahlensystems, mit den herstellerepezifischen Produktkenngrößen zusammen und setzt diese in Kontext mit der individuellen Betriebsdatenselektion. Das Simulationswerkzeug ist entsprechend dem vorgeschalteten Datenschwerpunkt des Schreddertools primär auf die Prozesskostensimulation ausgerichtet, kann aber in Folge der Baukastenstruktur mit standortrelevanten Marktdaten verknüpft werden. Dadurch bleibt die Risikobewertung einer Großinvestition keine Momentaufnahme der prognostizierten Kostenstruktur des Schredders, sondern kann über einen längeren Zeitraum dargestellt werden. Der Einsatz von Planungstools in der Entscheidung von Investitionsfragen ist ein geläufiges Hilfsmittel des Anlagen- und Betriebscontrollings. Im Vergleich zu einer mengenbasierten Investitions- und Betriebskostenevaluation,

steckt die Besonderheit dieser Anwendung in der automatisierten Gewichtung von systemtypischen energie- und stoffstromgelenkten Bezugsgrößen. Die vordefinierten Bezüge im Rahmen der Kostenstandardisierung (Kapitel 8.3.1.2) sparen aufwändige Einzelaufschlüsselungen von Verbrauchern und beschleunigen Entscheidungsprozesse in der Anlagenplanung.

Die folgenden Auszüge der entwickelten Entscheidungsmatrix sind unter Berücksichtigung der unternehmensinternen Datensperre als Richtwerte ausgelegt und dienen primär der Prozessinterpretation. Sie sind weder als Detailreferenz einsetzbar oder abschließend, noch erheben sie Anspruch auf Vollständigkeit. Die gelieferten Informationen dienen dem Verwendungsnachweis und stellen eine beispielhafte Anwendung des Planungswerkzeugs in der Operative dar.

Die Simulation eines Schredderkonzepts kann in mehreren Ausführungen erfolgen. Unter Einbindung des neuen Lastenheftes, ergeben sich diverse Mindestanforderungen, die rückwirkend vom Leser und zum besseren Verständnis für den folgenden Sachverhalt, in den Kapiteln 6.4 und 8.2 eingesehen werden können und bei einer Ausführung der Schredderanlage zu berücksichtigen sind.

Der Anwender hat die Möglichkeit das Simulationstool auf ökologische und/oder ökonomische Schwerpunkte auszurichten. Für den gegenwärtigen Anwendungsfall ergeben sich zwei unterschiedliche Konzeptvarianten. Ein System ist als Neuprojekt ohne vorhandene Infrastruktur gerechnet, das andere Schredderkonzept rührt aus einer standortgekoppelten Herangehensweisen. Auf Grund der Bindung an den Altbestand (Kapitel 10), liegt der Fokus einer Anlagenneuplanung zukünftig eher auf den gesetzten Bestandsparametern. Im Folgenden werden die beiden Varianten beispielhaft gegenübergestellt.

**Tabelle 28: Generierte Produktionsrandbedingungen der Schreddersimulation**

Produktionsrandbedingungen	Kalkulatorische Einheit
Arbeitstage pro Jahr	220 d
Arbeitstage pro Monat	18 d
Produktionsstunden ideal pro Tag	16 h
Durchsatz Anlage (Input)	130 - 160 t/h
Platzbedarf Anlage	21.510 m <sup>2</sup>
Ziel Verfügbarkeitsfaktor (Anlageneffizienz)	75,00 - 80,00 %

Die generierten Daten beziehen sich auf ein Schredderaggregat im Leistungsbereich von 3.000 bis 4.000 PS bei einem Durchsatz von 130 bis 160 t/h Schredderschrott. Die Anlage ist auf einem Zweischichtsystem ausgelegt, wie in Tabelle 28 dargestellt.

Aus dem Schichtsystem ergeben sich ideale Produktionszeiten von 16 h/d. Die gesetzlichen Arbeitstage werden auf Basis markttechnischer Parameter, wie bspw. der prognostizierten Verfügbarkeit des Eingangsmaterials, auf 220 Arbeitstage heruntergesetzt. Der errechnete Platzbedarf ergibt sich aus den Flächenmaßen der Anlagentechnik, bestehender Infrastruktur und Kapazitätsanforderungen aus der Lagerwirtschaft etc.

Entsprechend dem ausgearbeiteten Anforderungsprofil und Schwerpunkt dieser Arbeit, besteht die Anlage aus einem Schredderaggregat inklusive Antriebsstrang und PLT, adäquater Entstaubungstechnik, einer Abluftnachbehandlung, einer automatisierten Fe-Downstreamlinie und der dezentralen SLF-Aufbereitung. Auf die konstruktive und kalkulatorische Einbindung einer SSF-Linie wird in den betrachteten Konzeptvarianten verzichtet. Die Anlagentechnik generiert in Rückkopplung mit den Erfahrungswerten aus dem Schreddertool den betrieblichen Personalbedarf. Die fixe und variable Kostenstruktur deckt sich mit der Logik des operativen Schreddertools und legt die Bewertung der Anlage modular und in ihrer Gesamtheit fest.

Eine Umlage für die Handelsbeteiligung prozessübergeordneter Funktionen (Overhead) kann im Tool berücksichtigt werden, ist für die hiesige parameterverdeckte Kostenbetrachtung auf Grund der Zahlenverwässerung, aber nicht mit eingebunden (Kapitel 8.3.1.1).

Die Tabellen in der Abbildung 68 stellt die beiden simulierten Konzeptvarianten beispielhaft in einem Auszug der Frühschicht gegenüber. Die Aufschlüsselung der Anlagenkosten wird darüber hinaus in Abbildung 69 für die Variante 2 beispielhaft im Schichtmodell dargestellt. Der Unterschied in den Produktionskosten von 21,24 €/t zu 27,84 €/t rührt aus den wesentlich höheren Anschaffungswerten der Variante 2. Im Gesamtinvestment und ohne die Berücksichtigung der kalkulatorischen AfA auf Monatsbasis [39], liegt eine im Freien, aber auf befestigter Fläche geplante Anlage, primär auf Grund der infrastrukturellen Aufwendungen, ca. 35 bis 40 % höher, als die Version 1 aus der Bestandstechnik heraus. Der Unterschied in den monatlichen AfA-Kosten ist im Verhältnis dazu insofern niedriger, dass feste Bauten eine längere kalkulatorische AfA von bspw. 25 bis 40 Jahren zulassen, als der Anlagenbau selbst (bspw. sechs Jahre). Der Effekt der infrastrukturellen Mehraufwendungen wird entsprechend eingedämmt. So unterscheidet sich die monatliche AfA für die beiden Konzeptvarianten um ca. 27 %.

Variante 1				Variante 2				
Früh				Früh				
	var. Kost.	fix. Kosten	Gesamt		var. Kost.	fix. Kosten	Gesamt	
Anlage	5.471,09 €	4.779,41 €	10.250,51 €	66,28%	7.664,73 €	7.383,89 €	15.048,62 €	74,26%
Unschlaggeräte	525,91 €	290,36 €	816,27 €	5,28%	525,91 €	290,36 €	816,27 €	4,03%
Infrastruktur	0,00 €	1.613,25 €	1.613,25 €	10,43%	0,00 €	1.613,25 €	1.613,25 €	7,96%
Handel	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00%	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00%
Personal	2.785,76 €	0,00 €	2.785,76 €	18,01%	2.785,76 €	0,00 €	2.785,76 €	13,75%

Summe (täglich)			Summe (täglich)		
8.782,76 €	6.683,02 €	15.465,78 €	10.976,39 €	9.287,50 €	20.263,90 €
Summe (monatlich)			Summe (monatlich)		
161.017,23 €	122.522,12 €	283.539,36 €	201.233,90 €	170.270,87 €	371.504,77 €
Summe (jährlich)			Summe (jährlich)		
1.932.206,82 €	1.470.265,45 €	3.402.472,27 €	2.414.806,82 €	2.043.250,45 €	4.458.057,27 €

produzierte Menge		produzierte Menge	
täglich	728 t	täglich	728 t
monatlich	13.347 t	monatlich	13.347 t
jährlich	160.160 t	jährlich	160.160 t

↓ Früh

**21,24 €/t**  
2.761,75 €/h

↓ Früh

**27,84 €/t**  
3.618,55 €/h

Abbildung 68: Teilauszug der kalkulatorischen Gegenüberstellung einer Anlagensimulation als Vorlage der Investitionsentscheidung

Die stundenbasierten variablen und tagesbasierten fixen Kosten werden für die einzelnen Schichten separat gebildet. Die variablen Kosten der Variante 1 machen 55 % der Gesamtkosten aus. In der Variante 2 werden diese auf Grund des höheren Fixkosteneffekts mit 53 % gewichtet.

Im Schichtmodell liegt die Spätschicht mit ca. 5 bis 7 % unterhalb der Produktionskosten der Fröhschicht. Abbildung 69 macht deutlich, dass das Schichtmodell auf Basis der hinterlegten Systemlogik, keinen Einfluss auf die Fixkosten der Anlage nimmt. Der Produktionskostenvorteil der Spätschicht entspringt folglich der reduzierten Personalbesetzung und ist auf die zeitlichen Warenannahmebeschränkungen am Schredder zurückzuführen.

Variante 2					
Anlagentechnik					
	Früh		Spät		Gesamt
Mühle	5.885,39 €	39,11%	5.885,39 €	39,11%	11.770,77 € 39,11%
Entstaubung	1.268,92 €	8,43%	1.268,92 €	8,43%	2.537,85 € 8,43%
Abluftnachbehandlung	1.534,17 €	10,19%	1.534,17 €	10,19%	3.068,35 € 10,19%
Fe-Linie	5.308,10 €	35,27%	5.308,10 €	35,27%	10.616,21 € 35,27%
SSF-Linie	0,00 €	0,00%	0,00 €	0,00%	0,00 € 0,00%
SLF-Linie	1.052,03 €	6,99%	1.052,03 €	6,99%	2.104,07 € 6,99%
Summe	15.048,62 €	100%	15.048,62 €	100%	30.097,24 € 100%

Abbildung 69: Teilauszug einer Kostenaufschlüsselung als Basis der Produktionskostenkalkulation im Entscheidungsprozess

Die kumulierten Zahlenwerte sind schlussendlich das abgewandelte Ergebnis einer isolierten Prozesskostenkalkulation und stellen zwei von vielen möglichen Kalkulationsvarianten in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen dar.

Neben den diversen prozentualen Abhängigkeiten, liefern die Zahlen die Erkenntnis, dass die Errichtung einer Schredderanlage außerhalb des Altbestandes, in Deutschland generell und unabhängig der Genehmigungsfreigabe, unwirtschaftlich sein wird. Hohe AfA-Kosten führen zu Markteintrittspreisen, die besonders gegenüber dem Preisgefüge der Anrainerstaaten mit exportausgerichteten Seehafenzugängen, schon heute nicht mehr bestehen. An dieser Stelle ist noch einmal zu betonen, dass Produktionskosten von 27,00 €/t und mehr nur den Basiswert für den Markteintritt darstellen. Unter Einbindung der übergeordneten Vertriebs- und Handelslogistik sowie Kosten für den Overhead, werden weitaus höhere Einkaufspreise im Tagesgeschäft erzielt.

Die Lösung der dargestellten Fixkostendegression lässt sich effektiv über zwei Ansätze herbeiführen: die Steigerung der Produktionsmengen oder die Verbesserung der Verfügbarkeit am Aggregat. Gemäß den in Kapitel 4.1 formulierten volatilen Entwicklungstendenzen im Schrottmarkt, ist zu berücksichtigen, dass eine generelle Produktionsmengensteigerung durch den Ausbau der Produktionskapazitäten nur dann sinnvoll ist, wenn das entsprechende Mengen- bzw. Bedarfsgerüst im Zugang und Absatz langfristig besteht. Der Sachstand in der administrativen Steuerung der Abwicklungsprozesse am Schredder (Kapitel 8.3.2) lässt sich an dieser Stelle insofern berücksichtigen, dass der Vertrieb auf Grundlage der Bedarfsdeckung und Kapazitätsgrenzen der Anlage, die monatliche Produktionsmenge festlegt. Der Einkauf geht in Rückkopplung an die Prozesskosten und Vertriebsmarge in den Markt und beschafft die erforderlichen Eingangsmengen. Ein kleineres Aggregat, mit geringerem Fixkostenanteil kann den Gesamtbedarf vielleicht nicht immer decken, erhöht aber den Spielraum im Einkauf, verbessert die Flexibilität bei der Umstellung auf wechselnde Inputströme und kann bei einem hohen Automatisierungsgrad variable Betriebskosten einsparen. Im Falle geringer Bedarfsmengen und folglich reduzierter Produktionsauslastung, wirkt sich die Fixkostenbelastung weniger negativ auf das Betriebsergebnis aus. Die Prozesskosten sind mittlerweile ein entscheidender Erfolgsträger im Schrottgeschäft.

In Hinblick auf die Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung von Inputmengen am Schredder, bleibt des Weiteren zu beantworten, ob das Mengengerüst der Gegenwart in den kommenden zehn Jahren so noch abbildbar ist und der kapazitätsreduzierte Schredder nicht langfristig in Deutschland den Wettbewerb bestimmt.



Neben der notwendigen Kapazitätseingrenzung mit ressourcenoptimierten Materialumschlags- und Behilfsprozessen, steht der modulare finanzierbare Aufbau einer Schredderanlage im Kern der Weiterentwicklung. Das Zu- und Abschalten von Prozesseinheiten und die Entwicklung des Gesamtkonzepts unter genehmigungsfreundlichen Gesichtspunkten, erhöht die Anpassungsgeschwindigkeit gegenüber dem Marktgeschehen und ermöglicht zukünftige emissionstechnische Weiterentwicklungen ohne aufwendige Behördenschritte. Dabei liegt der eigentliche Anreiz der kompakten Konzeptvariante 1 in der ökonomischen Optimierung des Bestandsprozesses, als vielmehr in der umweltschutztechnischen Reduzierung der Immissionsmengen infolge der Produktionsmengenbeschränkung.

Inwiefern eine solche Erweiterung der Bestandsprozesse zukünftig durchführbar ist und welches Entscheidungsgewicht die Behörden dabei einnehmen, wird im nachfolgenden Kapitel 10 diskutiert.

## **10 Systemischer Einfluss der Weiterentwicklung von Schredderanlagen**

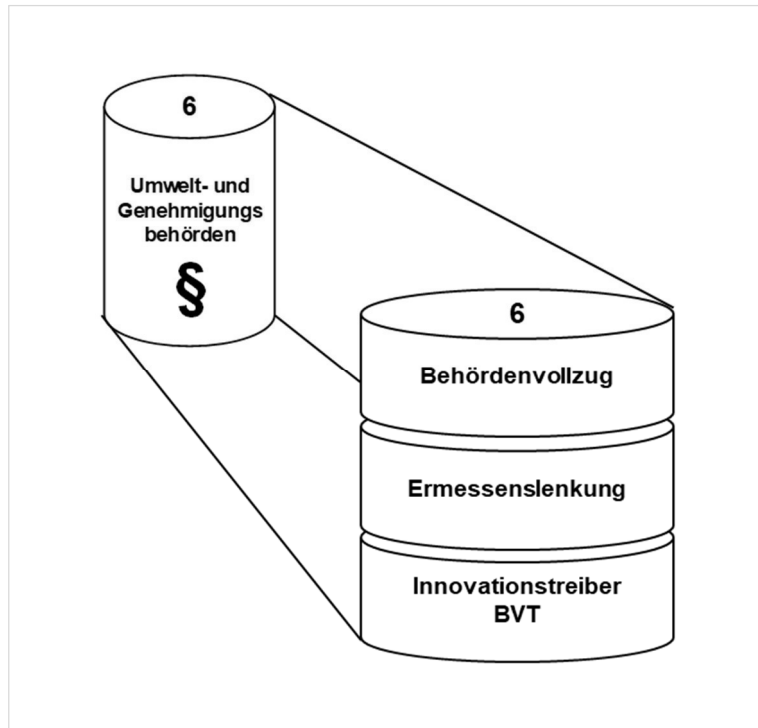
Im folgenden Kapitel 10 geht es weniger um die aus einer wesentlichen Änderung rührenden genehmigungstechnischen Folgeerscheinungen (diese wurden vornehmlich in den Kapiteln 6.3.5 und 6.5 aufgezeigt), als vielmehr um den Effekt, den die Weiterentwicklung von Schredderanlagen und Umsetzung dieser im Kontext der BVT sowie im Zusammenwirken mit den Behördenvertretern, erzeugen kann.

Auf Grund der hohen Individualität von Anlagen- und Änderungsgenehmigungen an IED-Anlagen, wird auf spezifische Empfehlungen im Umgang mit den zuständigen Behörden verzichtet. Dieses Kapitel gibt nicht die allgemeine Meinung der TSR wieder und ist lediglich ein Versuch, das hier ausgearbeitete Systemkonzept strategisch an die behördliche Vollzugsebene anzubinden.

### **10.1 Säule 6: Umwelt- und Genehmigungsbehörden**

Abbildung 70 stellt den sechsten Kerneinflussfaktor im Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen dar. Gegliedert in drei Systembausteine, deckt sie sowohl den Behördenvollzug, die Ermessenslenkung und die innovative Treibkraft gegenüber den BVT ab.

In dieser Konstellation ist das Zusammenwirken von Behörden- und Betriebsseite vereinfacht dargestellt und gilt als Leitlinie für die nachfolgende Argumentation strategischer Aufgaben und Potentiale bei der Weiterentwicklung von Schredderanlagen.



**Abbildung 70: Säule 6: wesentliche Systembausteine in der Zusammenarbeit mit den Umwelt- und Genehmigungsbehörden**

## 10.2 Strategien und Potentiale der Weiterentwicklung

Der ausführlich dargestellte formalrechtliche Rahmen für die Weiterentwicklung, den Betrieb und die Stilllegung von Großschredderanlagen ist grundsätzlich ausreichend, um die Stellung zwischen Behörden- und Betreiberpflichten (siehe rückwirkend Kapitel 2.4, 2.5 und 6.3.5) im Kontext des Systemkonzepts aufzuzeigen.

Auf Grund der phasenweisen Entwicklung von Innovationen und den rechtlichen Rahmenbedingungen sowie regional unterschiedlichen Zuständigkeiten (föderale Vielfalt Deutschlands), können vollzugsgebundene Nebenerscheinungen auftreten, die den Schredderbetreiber entlang der genannten Regelwerke (Kapitel 2 und 6) begleiten.

So besteht die Möglichkeit, dass bspw. das Bundesumweltministerium die Bindungswirkung einzelner Regelungen aus der TA Luft aufhebt und daraufhin Bund- und Länder-Arbeitsgemeinschaften für die betroffenen Branchen Vollzugsempfehlungen mit neuen Vorsorgeanforderungen veröffentlichen. Diese sind ein Indikator für den aktuellen Entwicklungstrend in der Pflichtwahrnehmung sowie Branchenkenntnis der Behörden und können für eine nachhaltige Zusammenarbeit von Schredderbetreibern und Umweltvertretern wegweisend sein [9].

Es besteht die Möglichkeit schredder- und betriebsspezifisches Fachwissen zu teilen, Wissenslücken zu schließen und dadurch den neuen Stand der Technik aktiv nach außen zu tragen.

Darüber hinaus erarbeiten die regional zuständigen Regierungsstellen (Ministerien und Präsidien) in regelmäßigen Abständen anlagenrelevante Überwachungspläne und veröffentlichen diese im Zuge dessen. Neben den in Kapitel 2.5 genannten Inhalten, legen die Pläne auch die Bestimmungen für die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Behörden fest [9]. Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass die Behördenvertreter im Schreddersegment mittlerweile auch überregional miteinander kommunizieren und ihr Erfahrungswissen austauschen („Arbeitskreis Schredder“).

Schredderbetreibern eröffnet auch dieser Informationskanal die Möglichkeit, Fachwissen über den Stand der Technik und aktuelle Innovationsprozesse zu teilen.

Neue Technologien bzw. der Einzug fachfremder Technologien in ein neues Anwendungsfeld, erweisen sich – und abgesehen davon, dass sie im spezifischen Regelwerk u.U. nicht erfasst sind – gerade im Anfangsstadium als schwer bewertbar.

In Fällen, in denen die TA Luft keine konkreten Auflagen zur Sachverhaltsermittlung im Genehmigungsverfahren und bei der Anlagenüberwachung enthält, müssen die Behörden auf Grundlage eigener Beurteilungs-/Ermessensgrenzen entscheiden [71]. Ein aktives Einbinden der Behördenvertreter in die Entwicklung neuer Technologien an Schreddern, kann in solchen Fällen der Ermessenslenkung dienlich sein.

Durch die Revisionszyklen des BREF (Kapitel 2.2.3) und der TA Luft (Kapitel 6.3.5) kommt es zu einer Überlagerung der Innovationsprozesse. Technologien die heute formalrechtlich als BVT im Schreddersegment verankert sind, können bereits morgen überholt sein. Erst durch die offizielle Aufnahme in die BVT und Nebenbestimmungen der Anlagengenehmigung von Marktbegleitern, werden umweltschutztechnische Weiterentwicklungen an Schredderanlagen zu einem Wettbewerbsvorteil.

Den genannten Zyklus vorausgesetzt, sind innovativ ausgerichtete Schredderbetreiber dazu angehalten, den Einzug ihrer Technologien in die BVT zeitlich so zu planen, dass diese im kommenden Turnus der Novellierung berücksichtigt werden können. Der Vollzug der BVT liegt dann erst fünf Jahre später. Wettbewerbsvorteile lassen sich hier folglich nur zeitversetzt generieren.

Neben den Wettbewerbsvorteilen aus der emissionstechnischen Weiterentwicklung von Schredderanlagen, stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Struktur des Genehmigungsverfahrens. Die in Kapitel 9 vorgestellten Technologien und Verfahrensprozesse sind überwiegend modular aufgebaut. Ungeachtet der Emissionsgrenzen, die für die gesamte Anlage gelten (Summe der prozessgebundenen Einzelquellen), ist eine klare Differenzierung der Betriebseinheiten bzw. Produktionssegmente in der Anlagengenehmigung insofern sinnvoll, dass sie Änderungsgenehmigungsverfahren im Zuge von Anlagenerweiterungen oder Verbesserungen beschleunigt und sich darüber hinaus als langfristig wirtschaftlicher erweist.

Durch die segregierte Genehmigung der Fertigungssegmente und ihrer Produktionseinheiten (siehe Kapitel 3.2) entsteht eine erhöhte Flexibilität im Entwicklungsprozess an Schreddern. Einzelprojektentscheidungen können beschleunigt werden und leiden im Zweifel nicht unter dem Genehmigungsdruck der Gesamtanlage.

Greift eine Erweiterung der Ablufttechnik bspw. in die Gesamtgenehmigung einer Altanlage ein und werden daraufhin alle umweltschutzrechtlichen Forderungen gemäß Kapitel 8.2.3 dieser Arbeit behördlich und flächendeckend gefordert, wird eine Optimierung im Bestand unwirtschaftlich. Ohne eine gewisse Kompromissbereitschaft im Genehmigungsverfahren, wird die Umsetzung effizienter, aber investitionskostenintensiver Umweltschutz- und Ablufttechnologie an Schredderanlagen, nur kapitalstarken Marktteilnehmern möglich sein.

Über das Prinzip der gestaffelten bzw. geteilten Änderungsgenehmigung erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Marktpartizipation. Anlageninnovationen finden einen perspektivisch schnelleren Zugang in die TWG und können für die novellierte Auflage des BREF in den BVT berücksichtigt werden. Der Schredderbetreiber bleibt bzw. wird zum Innovationstreiber.

Der Flexibilisierungsgrad in der Entwicklung von Schredderanlagen geht mit der Prozessflexibilisierung dieser Massenstromanwendungen, unter den genannten Herausforderungen im Markt (Kapitel 4) einher und wird auch in Bezug auf die sich ändernde Stoffstromkomposition, die Gegenstand des folgenden und damit abschließenden Kapitels des Systemkonzepts ist, zukünftig an Relevanz gewinnen.

Die strategische Einbindung und eine transparente Kommunikation mit den Umwelt- und Genehmigungsbehörden sorgen dafür, dass diese als Kerneinflussfaktor des Systemkonzepts, echte Potentiale in der effektiven Umsetzung und Entscheidungsfindung von Weiterentwicklungen an Schreddern heben.

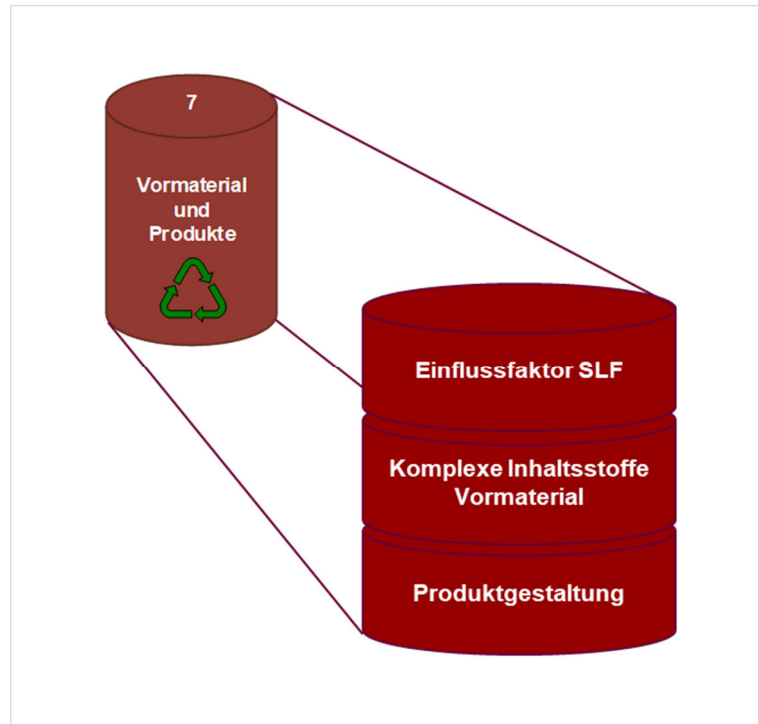
## 11 Stoffstromentwicklung an Schredderanlagen

Die stoffliche Zusammensetzung des Schreddervormaterials ist eine wesentliche Variable in der Gleichung aus Menge, Preis und Emissionen an Schredderanlagen. In diesem Kontext wird die SLF zur Messgröße für die werk- und wertstoffliche Entwicklung des Inputstroms. Das Kapitel 11 stellt in Rückkopplung mit den emissionstechnischen Erkenntnissen aus Kapitel 7 eine Verbindung zwischen der Mengenentwicklung des besagten Outputstroms und der Emissionsbandbreite an Schredderanlagen her. Dabei steht die Zunahme komplexer Inhaltsstoffe im Vormaterial im direkten Konflikt mit den Parametern Wertstoffpotential und Qualitätsanforderung im Absatz.

### 11.1 Säule 7: Vormaterial und Produkte

Das Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen schließt seinen Kreislauf um den siebten Kerneinflussfaktor (siehe Kapitel 5.1). In Anbetracht absatzoptimierter Produktionsbedingungen, definiert die Vormaterialkomposition maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Schredderprozesses. Die prozentuale Veränderung des SLF-Anteils kann als Qualitätsfaktor gewichtet und in Verbindung mit den Emissionsauswirkungen an Großschreddern gebracht werden. Aus der historischen Mengenentwicklung diverser in- und ausländischer Schredderanlagen der TSR, lässt sich ein Trendverlauf der SLF im Wertstrommodell ableiten. Die Analyse der Produktionsdaten erfolgt sowohl mengen- als auch preisbezogen, da Ausbringung und Entsorgungskosten in der genannten Gleichung entscheidend zur Wirtschaftlichkeit der Schredderanlage beitragen und die produktionsstrategische Ausrichtung der Betreiber beeinflussen.

Die Betrachtung komplexer Inhaltsstoffe im Input stellt den zweiten Baustein des Kerneinflussfaktors dar. Im Zuge des Kapitels 11.3 werden qualitäts- und verarbeitungsrelevante Werk- und Störstoffe im Inputstrom des Schredders betrachtet. Ihr Einfluss auf das Produktportfolio sowie die daraus resultierenden Konflikte im Absatz, werden im dritten Baustein unter der Produktgestaltung zusammengefasst. Abbildung 71 stellt die genannten Systembausteine der Säule 7 grafisch dar.



**Abbildung 71: Säule 7: wesentliche Systembausteine in der Beschreibung stoffstromrelevanter Einflussgrößen**

## 11.2 Einflussfaktor SLF

Grundsätzlich vertritt das hier geführte Systemkonzept die These, dass die SLF ein wesentlicher Indikator für die Werthaltigkeit des verarbeiteten Vormaterials ist. Wobei unter den Mengenbilanzen aus Kapitel 9.2.3.3 anzumerken gilt, dass die prozentuale Minderung der Verwertungsfraktionen aus SLF-fein und -grob allein nicht ausreicht, um einen positiven Ertragseffekt abzuleiten. Eine Gewichtung der SLF hat immer stoffstrombasiert in der Gesamtbilanz der Kernoutputsorten zu erfolgen. Unter dieser Prämisse fallen neben der reinen Mengenverteilung auch die Ausbringungsquoten der SSF ins Gewicht. Eine SSF aus Karossen ist i.d.R. werthaltiger, als die des klassischen SVM. Im Gegensatz dazu ergeben sich für Karossen höhere Entsorgungsmengen für die thermische Verwertungsrouten, welche wiederum bilanztechnisch für die Ertragsrechnung von Relevanz sind. Interessant wird diese Gleichung bei der Veränderung der Entsorgungskosten, speziell bei einer Negativentwicklung [- EUR] oder der preislichen Annäherung der SLF-Fein- zur SLF-Grobfraktion. Negativ meint in diesem Zusammenhang eine Entsorgungspreissteigerung aus dem Blickwinkel des Schredderbetreibers und mündet konsequenter Weise nur dann in einem negativen Ertragseffekt, wenn diese im Einkauf nicht eingepreist werden kann. Auf Grund der aktuellen Marktlage, wird ein negativer Ertragseffekt durch die Entsorgungspreissteigerung angenommen.

So wird im Folgenden sowohl das Mengen- als auch Preisgerüst an zehn ausgewählten Schredderanlagen der TSR Gruppe für den Zeitraum 2010 bis 2018 untersucht und für die Argumentation der Kernthese dieses Hauptkapitels herangezogen. Auf Grund unterschiedlicher gesetzlicher Vorgaben und Preisstrukturen in der Entsorgung [12], ist eine länderspezifische Trennung (Nationalstaaten) der Schredderstandorte sinnvoll. Die Auswertung der Produktionsdaten erfolgt auf Basis der in Kapitel 3.3 genannten Kernoutputsorten für jede Schredderanlage separat. Die Interpretation von Trendverläufen und Mengen-Preis-Bilanzen wiederum, wird im Gesamtkontext geführt.

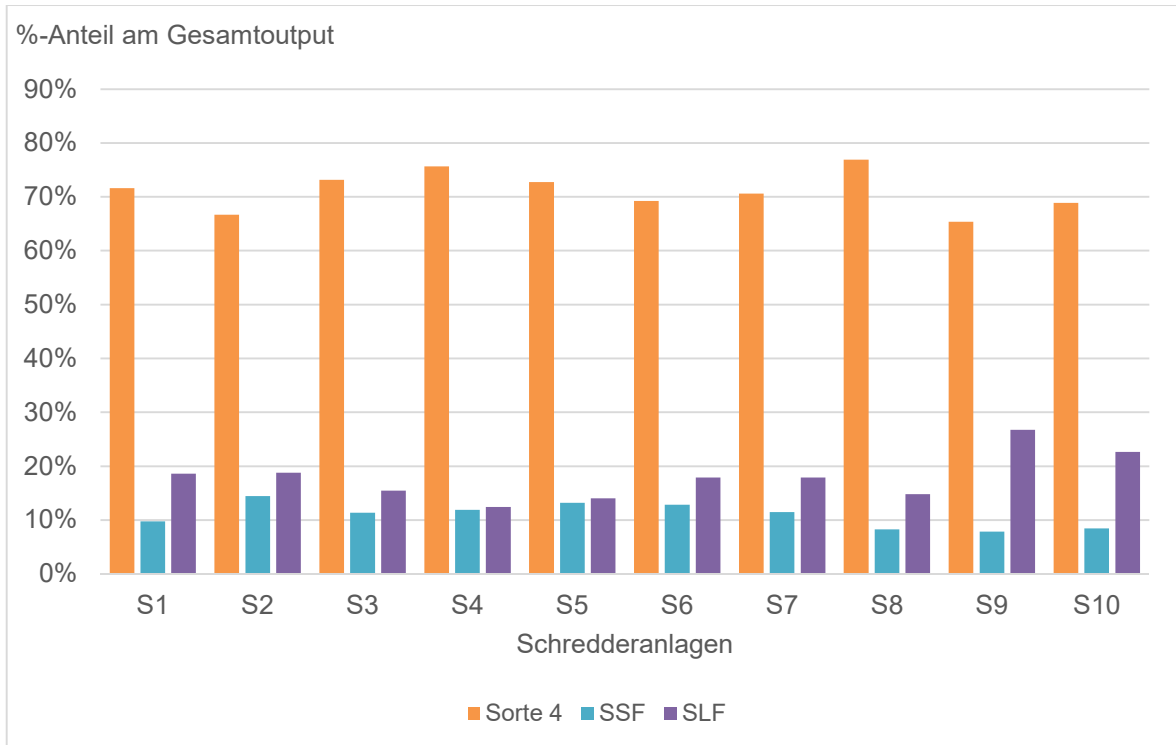
Für die deutschen Standorte sind nur solche Inputsorten gewichtet, die neben der Sorte 4 und SSF auch in einer SLF resultieren. Schreddervormaterial, das keine bzw. eine unverhältnismäßig geringe SLF erzeugt, wie bspw. reine Blechabfälle oder die Umarbeitung einer anhaftungsfreien NE-Fraktion, wird von der statistischen Auswertung ausgeschlossen.

Bei den ausländischen TSR-Standorten ist diese Sorten- bzw. Mengenbereinigung nicht berücksichtigt, da der Anteil von Sorten mit niedrigem SLF-Ausgang, verhältnismäßig gering und infolgedessen statistisch wenig signifikant ist. Die Auswertung setzt voraus, dass sich eine generelle Mengenreduzierung im Eingang gleichmäßig auf den Sortenkatalog im Output verteilt.

Die Urdaten sind auf Grund von Buchungs- und Bewertungsstrategien im Rechnungswesen teilweise nicht periodengerecht verteilt und wurden auf Basis produktionsgerechter Kennzahlen statistisch bereinigt. Des Weiteren wird in der nachstehenden Analyse keine Ursachenermittlung für die SLF-Mengenverhältnisse an den Einzelstandorten durchgeführt, da diese Informationen dem Sperrvermerk unterliegen und zusätzlich den Rahmen der Argumentationskette sprengen würden. Grundsätzlich darf davon ausgegangen werden, dass Schredderanlagen mit einer Mühlenabsaugung höhere SLF-Anteile erzeugen, als Anlagen ohne den direkten Entstaubungsweg. Keine der dargestellten Schredderanlagen wurde im Laufe der Betrachtungsperiode wesentlich in diesem Bereich nachgerüstet. Die verzeichneten Mengenveränderungen sind damit im Kern input- bzw. kompositionsgebunden.

In der folgenden Abbildung 72 ist die Stoffstromverteilung der genannten zehn Schredderstandorte (S1 bis S10) über einen Zeitraum von sieben bis neun Jahren gemittelt dargestellt. Die deutschen Standorte finden sich unter den Positionen 1 bis 4. Der Anteil der Gesamt-SLF liegt in der Auswertung zwischen 12,45 und 26,75 % bei Standardabweichungen von 9,40 bis 35,26 % zum jeweiligen Mittel. Die Werte decken sich mit der im Einführungskapitel 3.3 aufgezeigten typischen Mengenverteilung für die Kernoutputsorten an Großschreddern.

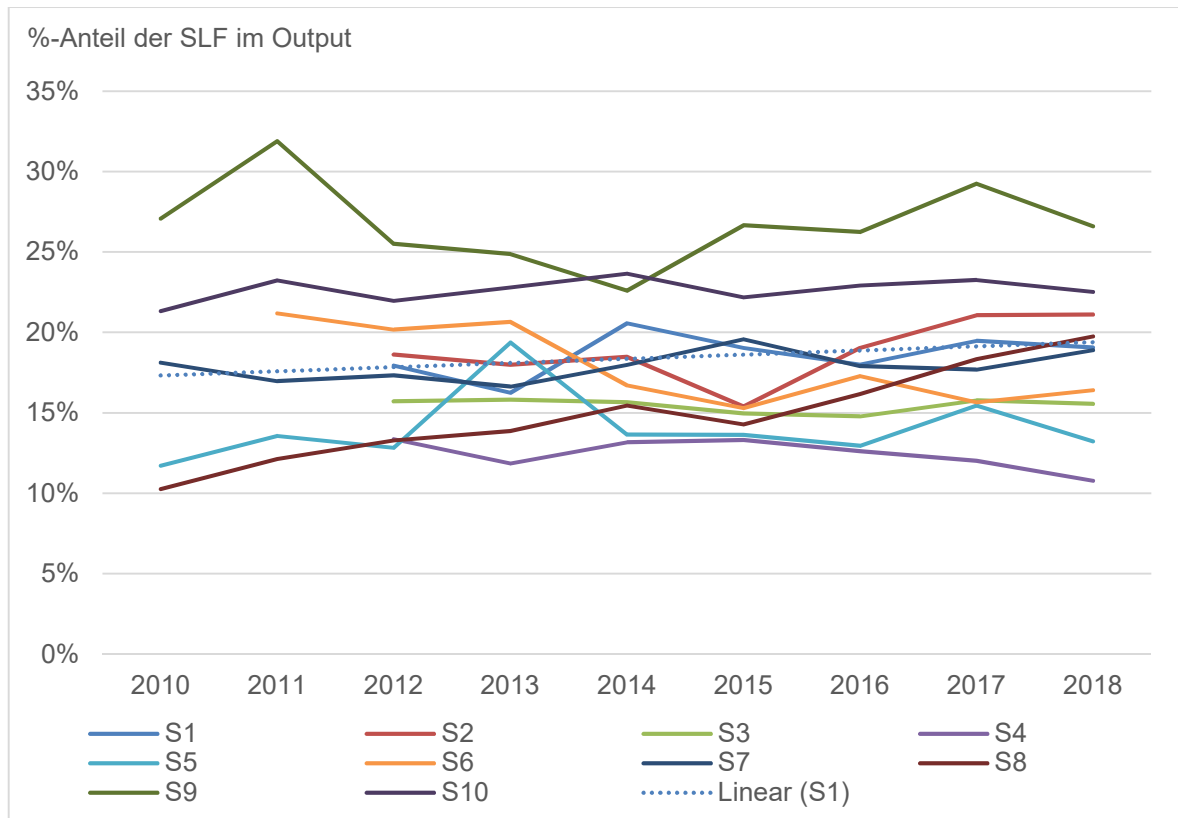




**Abbildung 72: Gemittelte Stoffstromverteilung an Schreddern von 2010 bis 2018**

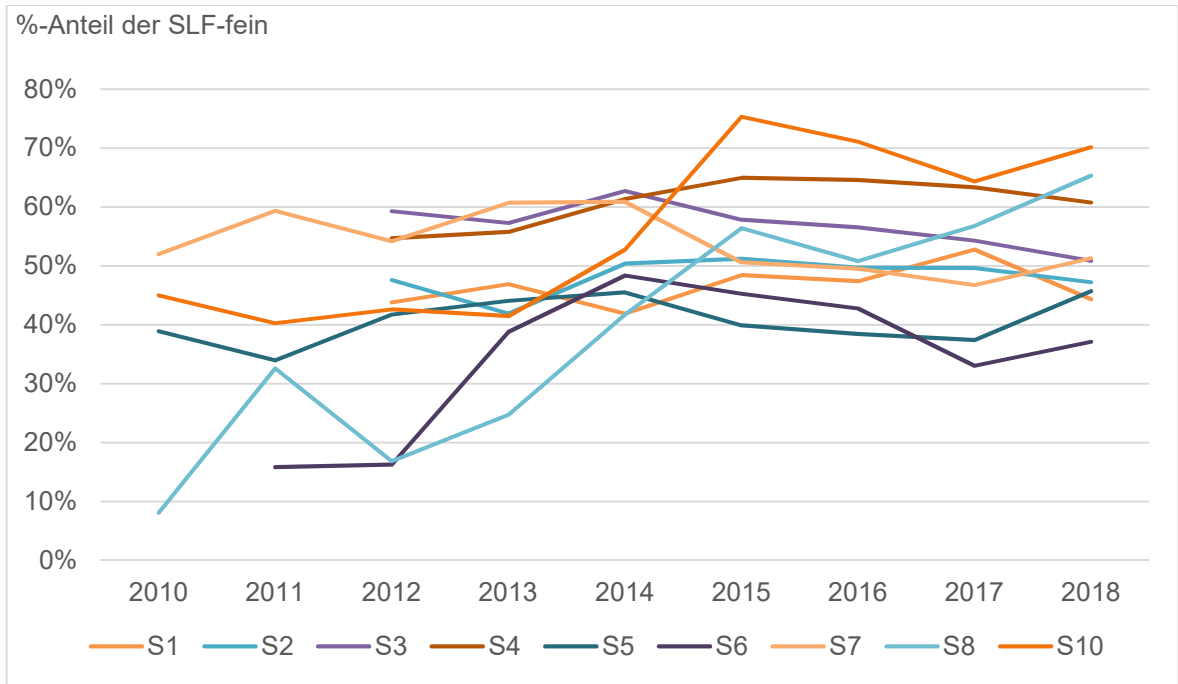
In Ergänzung dazu stellen die Kurven in Abbildung 73 die SLF-Gesamtmengeentwicklung der zehn Schredderstandorte über den besagten Zeitraum zusammen. Die Mengenauswertung für die deutschen Schredder beginnt erst ab dem Jahr 2012. 60 % der Schredderanlagen verzeichnen einen Anstieg der SLF im Verhältnis zu den Outputströmen Sorte 4 und SSF. Im Vergleich dazu weisen nur zwei Schredder einen signifikanten Rückgang der SLF-Quoten auf (S4 und S6). Die restlichen Anlagen stagnieren in ihrer Entwicklung der SLF-Anteile um 15,5 und 27,5 %. Ein überproportionales Wachstum spezifischer Inputsorten wurde im betrachteten Zeitraum für keine Anlage verzeichnet. Der gemittelt positive Trendverlauf lässt sich folglich auf eine prozentuale Zunahme der Restfraktionsanteile im Vormaterial zurückführen.

Generell ist bei der Interpretation der Daten aus den Jahren 2010 und 2011 der Effekt der Abwrackprämie zu berücksichtigen. Statistisch dürfte sich daraus ein entsprechender Fehler im Trendverlauf ergeben, der an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird, da sich die prozentuale Zunahme der SLF wesentlich über die genannten Jahre hinaus verändert und die Mengenbetrachtung speziell für die deutschen Schredder erst ab 2012 beginnt.

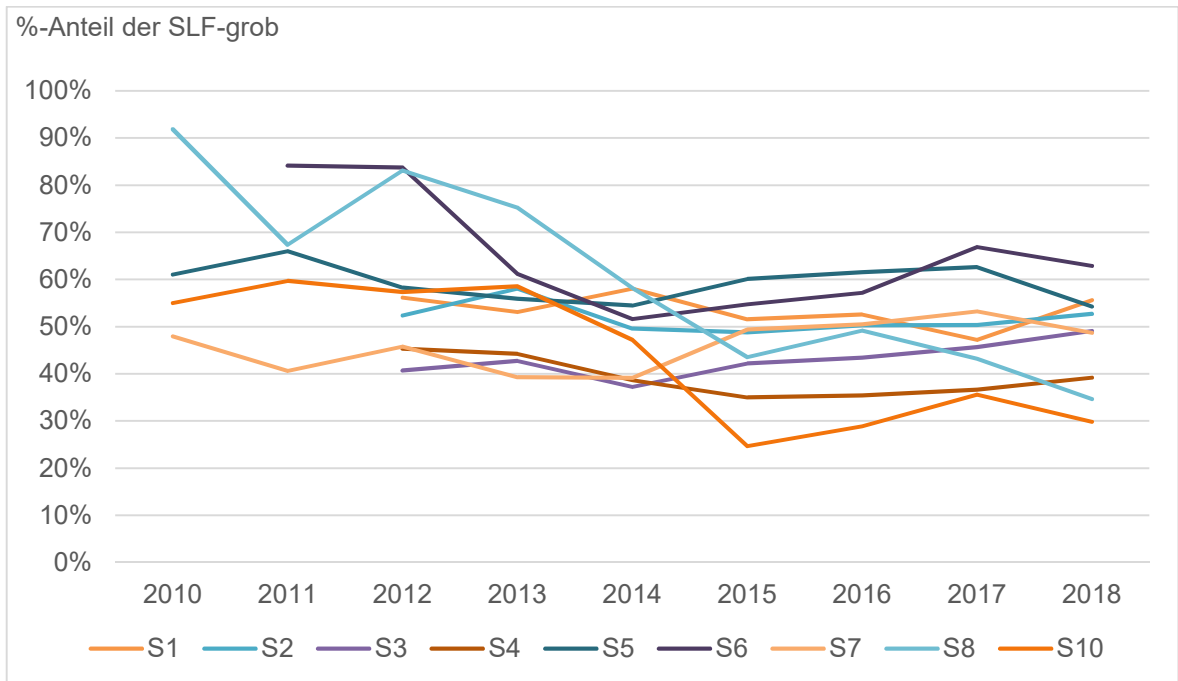


**Abbildung 73: Prozentuale Entwicklung der SLF-Anteile an Schreddern von 2010 bis 2018**

Die Mengenauswertung der SLF kann des Weiteren auf Grundlage ihrer Fein- und Groban-teile erfolgen. Unabhängig der Siebschnittspezifikationen an den einzelnen Schredderanlagen fällt auf, dass die Entwicklung der Mengenverteilung in den Kornfraktionen, über den Zeitraum von 2010 bis 2018 gegenläufig ist. In der Abbildung 74 und Abbildung 75 werden die prozentualen Mengenverteilungen der SLF-fein und -grob aufgezeigt. Die Kurven beschreiben eine deutliche Zunahme des Feinkornanteils in der Kernoutputfraktion. Der Anteil der Grobfraktion sinkt.



**Abbildung 74: Prozentuale Entwicklung der SLF-fein an Schreddern von 2010 bis 2018**



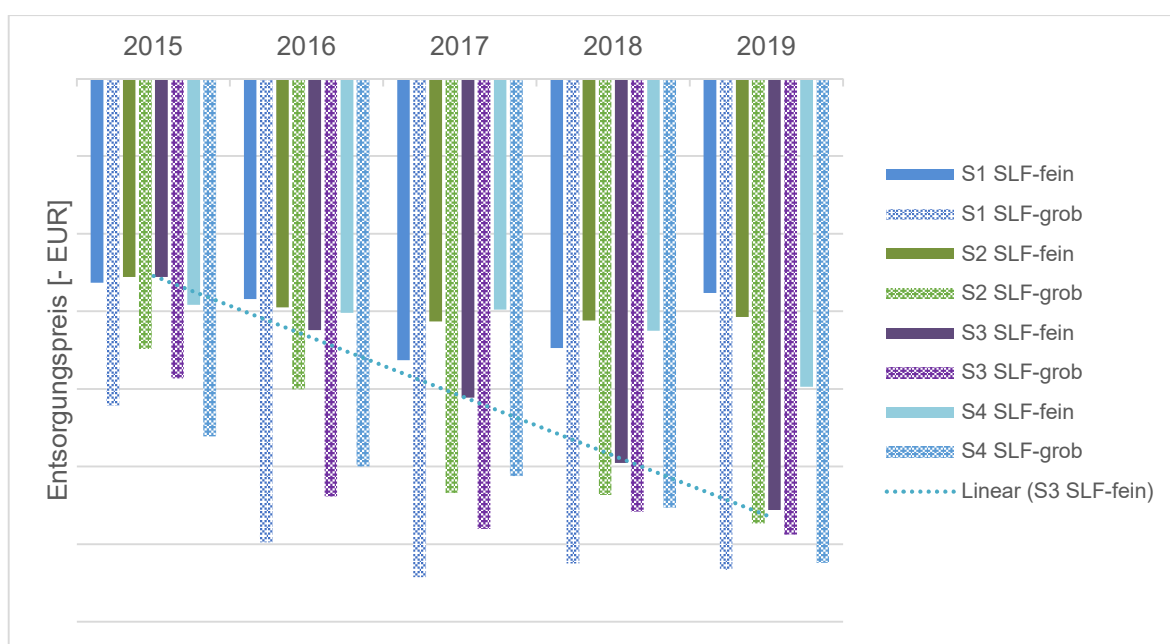
**Abbildung 75: Prozentuale Entwicklung der SLF-grob an Schreddern von 2010 bis 2018**

Diese Entwicklung lässt sich nicht allein auf einen erhöhten Feinkornanteil (Schmutz) im Vormaterial zurückführen. Weitere Gründe für diese Entwicklung stecken u.a. in den unterschiedlichen Verwertungskosten, gepaart mit den Annahmebedingungen der Entsorger

(siehe rückwirkend Kapitel 9.2.3.3) und der vereinfachten Einhaltung der Verwertungsquoten durch die stoffliche Verwertungsrouten.

Trotz einer Anpassung des Siebschnitts von 15 auf 10 mm (Qualitätsanforderungen Bergversatz) an Dreien der vier deutschen Schredderanlagen im betrachteten Zeitraum, war ein signifikanter Anstieg des Feinkornanteils in der Gesamt-SLF zu verzeichnen (Abbildung 74).

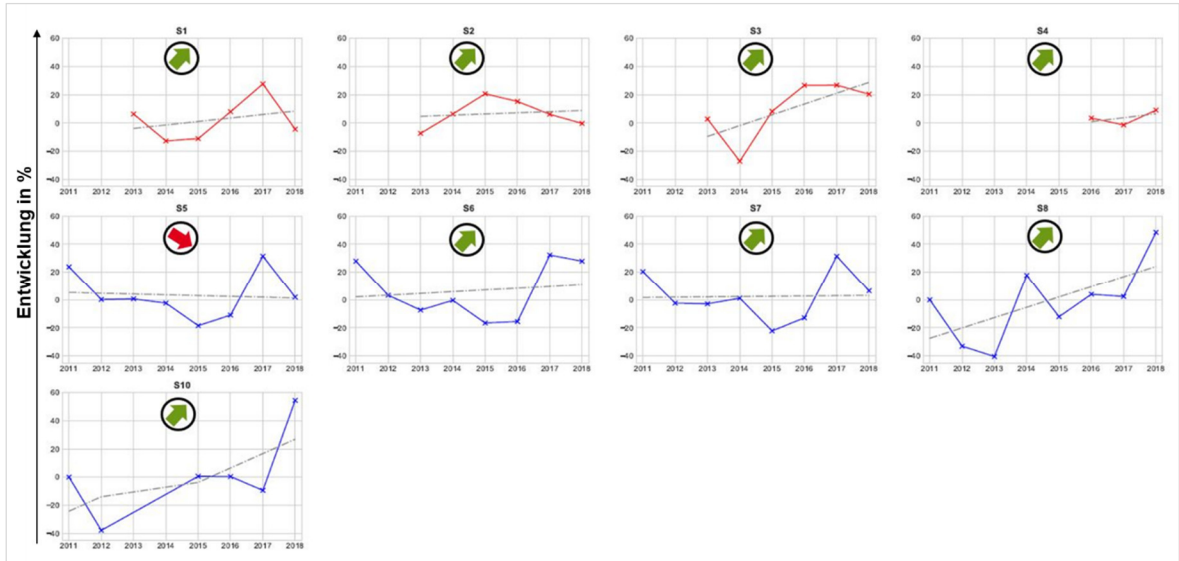
Abbildung 76 zeigt darüber hinaus den Preisunterschied der beiden Fraktionen für die vier deutschen Referenzanlagen auf und untermauert das Bestreben der Schredderbetreiber, eine größere Menge der SLF in die Feinfraktion zu fahren.



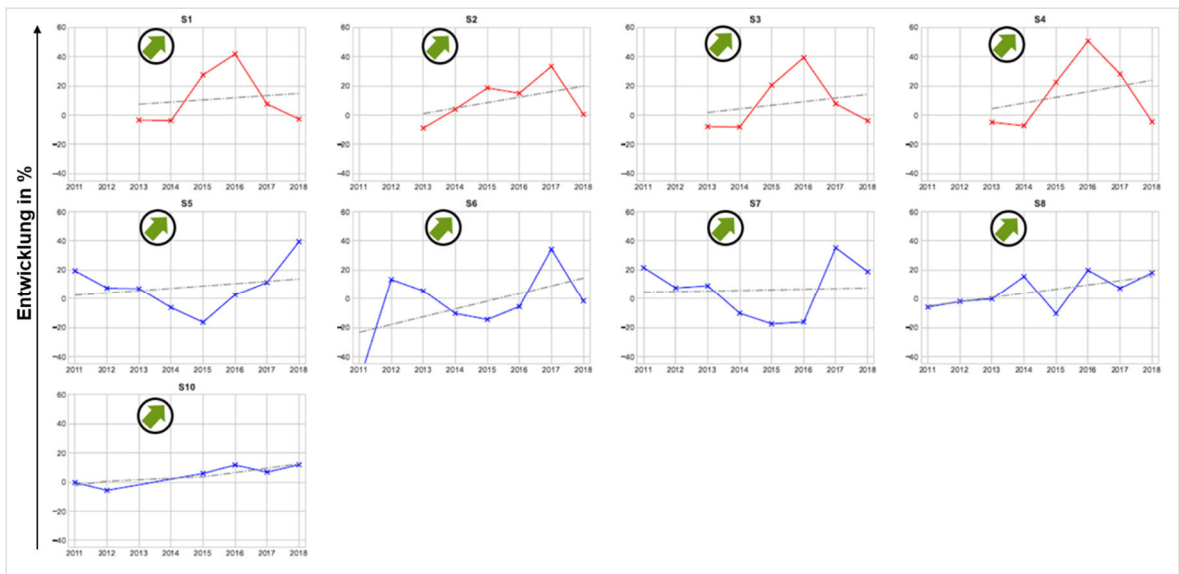
**Abbildung 76: Entsorgungspreisvergleich SLF-fein und -grob an Schreddern von 2015 bis 2019**

Die Preisentwicklung in den beiden Unterfraktionen ist eine Folge der zunehmend eingeschränkten Verwertungswege. Die Preisangleichung der SLF-fein an das Niveau der Grobfraktion (S3 in 2019), kann einen nachhaltigen Einfluss auf den Umgang mit der SLF an Schreddern haben.

Zusammenfassend ergibt sich für alle neun bewerteten Schredder eine erhebliche Steigerung der Entsorgungskosten der SLF-grob. Mit Ausnahme einer Referenzanlage (S5) findet sich dieser Trend auch in der Feinfraktion wieder. Abbildung 77 und Abbildung 78 stellen die Preisentwicklung der SLF-Unterfraktionen für einen Teil der Referenzanlagen in Liniendiagrammen über den Zeitraum 2011 bis 2018 grafisch dar.



**Abbildung 77: Preisentwicklung der SLF-fein an Schreddern von 2011 bis 2018**



**Abbildung 78: Preisentwicklung der SLF-grob an Schreddern von 2011 bis 2018**

Die Annahmebedingungen der (stofflichen) Entsorger sind eine treibende Kraft für die preisliche Entwicklung der Feinfraktion: ohne die stoffliche Verwertung der Feinfraktion, keine Einhaltung der Verwertungsquoten. Werden die Annahmebedingungen der Entsorger nicht eingehalten, entsteht ein Entsorgungsengpass, der zu einer zeitweisen Stillsetzung der Schredderanlage führen kann. Damit ist die Annäherung der beiden Preiskurven streng genommen für den Schredderbetreiber vorerst von sekundärer Bedeutung.

Die nachgewiesene kontinuierliche Preissteigerung legt die Überlegung nahe, ob eine lineare Korrelation zwischen der Entwicklung der SLF-Mengen und dem Preisgefüge am Entsorgungsmarkt existiert? Sinkt die produzierte SLF-Gesamtmenge in Folge steigender Entsorgungspreise?

Die im Rahmen dieser Fragestellung durchgeführte Korrelationsanalyse (keine Kausalität) basiert auf den sogenannten „Faustregel von Cohen“ (Effektstärke). Für die betrachteten Schredderanlagen ergeben sich aus der Verbindung von SLF-Mengen und Preisentwicklung sowohl gegenläufige, als auch gleichläufige Tendenzen und können nicht allgemeingültig auf einen omnipräsenten Kausalitätsansatz umgelegt werden. Aus gegebenem Anlass wird auf eine Detailausführung der standortspezifischen relativen Entwicklungstrends im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung verzichtet.

Zukünftig kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei prozentualer Steigerung der SLF im Vormaterial und zunehmenden Entsorgungskosten, die Produktionsmengen an Großschredderanlagen sinken werden. Das Kreislaufmodell in Abbildung 79 stellt diesen Zusammenhang und seine Folgeerscheinungen am Schreddermarkt grafisch dar.



**Abbildung 79: Kreislaufmodell für den Einfluss der SLF-Mengen- und Entsorgungspreissteigerung**

Aus der Annahme, dass die Reststoffanteile im Schreddervormaterial in den kommenden zehn bis 15 Jahren weiter steigen werden, lässt sich ein negativer Effekt auf das Wertstoffpotential im Schredderinput ableiten. Je kleiner der Anteil Fe- und NE-haltiger Komponenten, desto geringer die Wertschöpfung am Schredder und die daraus resultierende Produktdiversifikation. Ohne ein metallurgisch ausgereiftes Produktportfolio bleibt ein ökonomisch stabiler Marktzugang zu den Abnehmern im Wertstrommodell aus.

Auf der anderen Seite sorgen Entsorgungsengpässe (Kontingentvergabe) bei den Verbrennern, den Deponien oder Bergwerken für weitere Preissteigerungen, die der Erzeuger i.d.R. nicht umgehend an seine Vormateriallieferanten weitergeben kann. Der Schredderbetreiber läuft der Preisentwicklung hinterher. Negative Ertragseffekte schlagen sich auf die Anlagenwirtschaft nieder, die Überkapazitäten im Schreddermarkt werden in Folge von Marktaustritten abgebaut. Neben dem Ausscheiden von Marktteilnehmern, kann dieser Abbau auch durch die Weiterentwicklung von Altanlagen auf kleinere Kapazitäten gelenkt sein (TSR-spezifisch).

Die sinkende Marktpartizipation von Schredderanlagen erhöht den Marktzugang Einzelner und damit aber auch die anteilig verarbeitete Menge der SLF. Der Zugriff auf mehr Menge steigert den Durchsatz je Einheit. Dieser kann sich wiederum negativ auf das Emissionspotential an den verbleibenden Schreddern auswirken.

Im folgenden Kapitel wird dieser angenommene Emissionseffekt, in Verbindung mit der stofflichen Weiterentwicklung des Vormaterials gebracht.

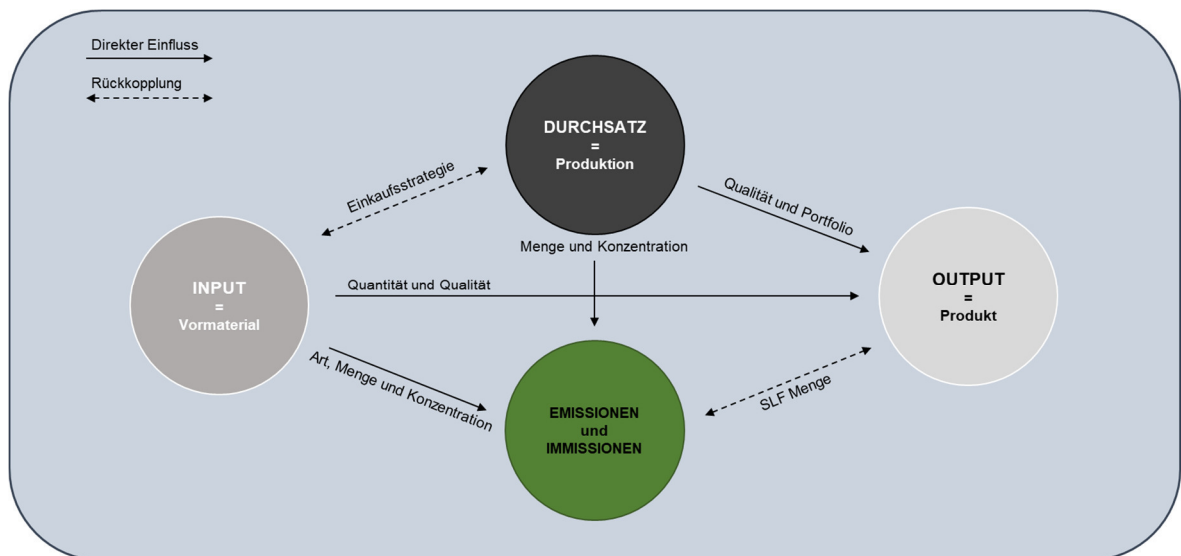
### **11.3 Komplexe Inhaltsstoffe im Vormaterial**

Mit dem Nachweis der prozentualen Mengensteigerung der SLF, wird die Brücke zur Vormaterialentwicklung an Schreddern geschlagen. Neben dem Wachstumstrend der SLF beschäftigt Großschredderbetreiber besonders die Fragen, wie komplex die Inhaltsstoffe im Sinne der wert- und werkstofftechnischen Komposition im Input zukünftig sind und ob diese Stoffe neben einer Wertminderung im Absatz, auch einen Effekt auf den Aufbereitungsprozess haben? Geprägt wird diese Fragestellung dabei vom emissionstechnischen Schwerpunkt dieser Arbeit.

Der Umfang und die Effekte des Vormaterials an Schreddern sind bereits in Kapitel 7 emissionstechnisch hinreichend beleuchtet worden, sollen aber in Verbindung mit der Einführung aus Kapitel 4.2, unter wirtschaftlichen Aspekten hier noch einmal diskutiert werden. Abbildung 80 stellt die Basis der Argumentationskette in einem Kreislaufmodell dar und knüpft an die administrative Steuerung des Produktionsprozesse aus Abbildung 41 an.

Der Input beeinflusst Menge und Qualität der erzeugten Outputfraktionen maßgeblich. Darüber hinaus wird die Qualität und Produktbandbreite im eigentlichen Aufbereitungsprozess gemindert oder verstärkt.

Weiter existiert eine Abhängigkeit zwischen dem Vormaterial und der Art, Menge sowie Konzentration der Emissionen an Schreddern, denen der Verarbeitungsprozess besonders mit den Einrichtungen im Schreddersegment 4.1 (siehe rückwirkend Abbildung 3), für einen positiven Immissionseffekt entgegensteuert.



**Abbildung 80: Der Einfluss komplexer Inhaltsstoffe im Schreddervormaterial**

Rückkopplungen entstehen in dem betrachteten Modell in der produzierten SLF-Menge und den Emissionen sowie der Produktion und dem Einkaufsprozess. Infolgedessen wird der Input zum entscheidenden Bindeglied in der Wertschöpfungskette des Schredderprozesses.

Stoffliche Veränderungen von Struktur- und Funktionswerkstoffen finden sich nicht nur im Produktdesign von Automobilen wieder. Der Einsatz innovativer oder komplexer Werkstoffe ist heutzutage auch in anderen Komponenten- und Verbrauchermärkten vertreten [12]. Im Fachbereich Werkstofftechnik geht es heute nicht mehr nur allein darum Bauteile zu entwerfen, die unter wirtschaftlichen Aspekten ihrer ursprünglichen Funktion gerecht bleiben und eine höhere und dabei sinnvolle Lebensdauer erhalten [26]. Konsumgütergeprägte Gesellschaftsstrukturen vermindern Produktlebenszyklen und haben einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklungsrichtung der Werkstofftechnik.

Leichtbau durch Werkstoffe höherer Festigkeit, steigende Legierungsanteile, carbon- oder glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde (CFK/GFK), Bauteile mit

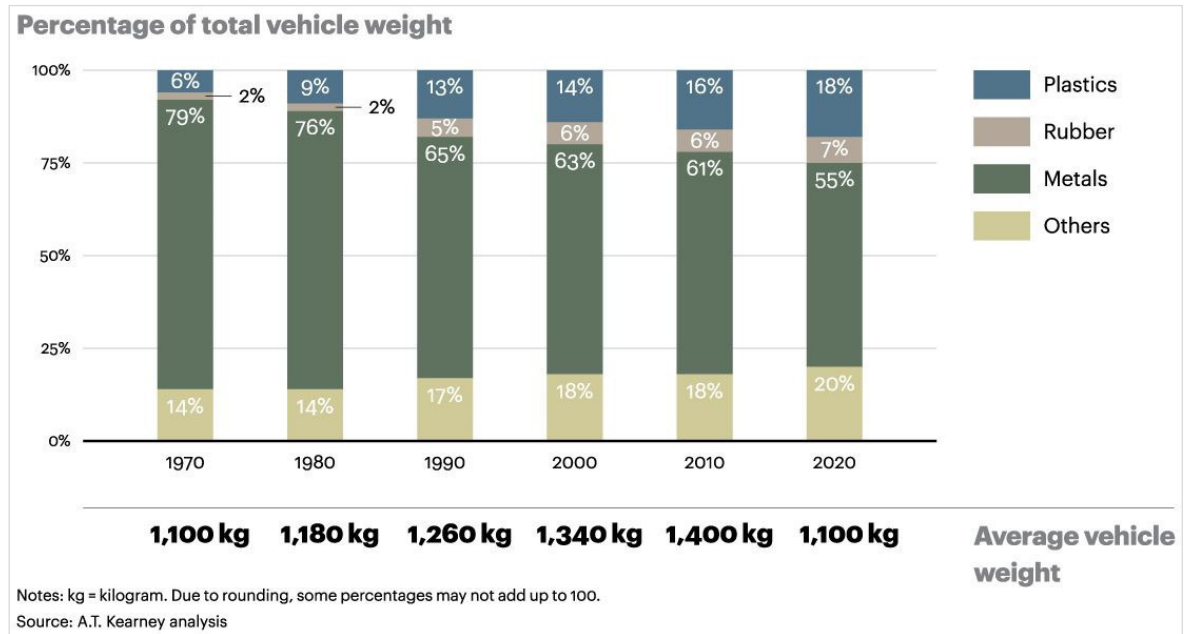


Metallschaumkernen, komplexe Verschleiß- und Oberflächenbeschichtungen (Nanopartikel) [26], vermehrte Kunststoffkompositionen und elektrische sowie elektronische Komponenten beeinflussen sowohl die outputspezifische Mengenverteilung und das Produktportfolio im Recyclingprozess, als auch den Zerkleinerungs- sowie Separationsvorgang am Schredder.

Das Recycling an Schredderanlagen ist i.d.R. reaktiv. Von der Entstehung zum Recycling von Altkarossen vergehen i.d.R. 15 bis 20 Jahre. Heutige Produktinnovationen sind damit eher eine Herausforderung in zehn bis 15 Jahren.

Auf Grund des vergleichsweise hohen Forschungs- und Entwicklungsbudgets sowie Stückzahlen in der Produktion, sind Automobilhersteller und ihre Erstausrüster (OEMs) jedoch der erste Anlaufpunkt, um die Werkstoffinnovationen von Morgen in der zukünftigen Vormaterialkomposition zu berücksichtigen und darüber langfristige Weiterentwicklungsmaßnahmen an Schreddern abzuleiten. Auf Basis der ermittelten Erkenntnisse über das Emissionsverhalten und die Mengenanteile der SLF-Verbrennung aus Karossen (Kapitel 7.3 und 9.2.3.3) ist es sinnvoll die Trends in der Werkstoffentwicklung des Automobilbereichs in die übergeordnete Analyse mit einzubinden. Für das Jahr 2017 dokumentiert das Umweltbundesamt für 49 erfasste Schredder- und Recyclinganlagen in Deutschland die Produktion von 390.000 t SLF. Ca. 25 % dieser Fraktion entsprangen der Altfahrzeugverwertung [38]. Wobei die Zahlen mit äußerster Vorsicht zu genießen sind. Die hier betrachteten deutschen Referenzanlagen produzieren im Schnitt allein 120.000 t SLF pro Jahr. Die reale Menge dürfte für Deutschland eher bei 700.000 bis 800.000 t SLF liegen.

Die Entwicklung des Materialmix in Karossen über die letzten 50 Jahre in Europa ist ein Ansatz den Einzug alternativer Werkstoffe in die Produktgestaltung aufzuzeigen. Die folgende Abbildung 81 ist Teil einer A.T. Kearney-Studie aus dem Jahre 2012. Neben der dokumentierten Gewichtsreduzierung der Neukarossen seit 2008 um 20 %, prognostiziert die Studie den Anteil kunststoffverwandter Bauteile in Automobilen auf ca. 25 % im Jahre 2020 [72].



**Abbildung 81: Prozentuale Entwicklung und Prognose des Fahrzeuggewichts unter Berücksichtigung des verbauten Materialmix von 1970 bis 2020 [72]**

Während sich die Studie vornehmlich auf den Anteil und die Zusammensetzung verschiedener Kunststoffe im Fahrzeugbau und ihrer Marktrelevanz für die Chemieindustrie konzentriert, setzt eine zeitgleiche Marktanalyse der Firma McKinsey & Company, Inc. auf den Einfluss des Leichtbaus in unterschiedlichen Industriesegmente. Für den Automobilsektor legt die Studie den Anteil von Leichtbauteilen aus hochfesten Stählen, Aluminium und faserverstärkten Kunststoffen auf 60 bis 70 % für das Jahr 2030 fest. Der massenhaften Einsatz von CFK-Komponenten in Volumenmärkten wird hier ausgeschlossen, sodass der Eingang relevanter Losgrößen im Karosenschrott für den Schredder vorerst unberücksichtigt bleibt (mangelnde Großserientauglichkeit) [73].

Dem gegenüber stehen die Anteile der heutzutage verwerteten Altkaros. Die Ergebnisse einer Verwertungs- und Prognosestudie über Altkaros des Umweltbundesamts aus dem Jahre 2017 zeigen, dass der Anteil von Fe- und Metallbauteilen im Schnitt bei etwa 75 % liegen soll (für Karos ab den Jahrgang 2000 aufwärts) [74]. Erfahrungen der TSR Gruppe zeigen, dass solche Werte in der Schredderroute nur bedingt vorliegen. Wertstoffliche Beraubung der Altkaros und karossenfremde Reststoffanteile (Dreck) von bis zu 25 %, führen zu verminderten Ausbringungsquoten in der SSF und Sorte 4.

Vergleicht man die historischen Prognosen mit aktuellen Entwicklungstrends im Karosseriehohbau, liegt die zukünftige Herausforderung im Vormaterial primär in hybriden Multimaterialbauweisen. Diese Mischbauweise führt mehr Aluminium oder andere NE-Metalle, weniger Stahl und neue Verbundwerkstoffe im Hochpreissegment der Automobilhersteller ein. Die Kompositbauteile setzen sich bspw. aus GFK, Kunststoffspritzguss, Strukturschaum und hochfesten Stahlblechen zusammen [75]. In dem vom Fraunhofer-Institut entwickelten laserunterstützten „Tapelege-Verfahren“ werden Leichtbauteile direkt auf die Stahloberfläche gefügt [76]. Ein ähnliches Produkt kommt aus dem Hause der ThyssenKrupp Steel Europe AG. Der Stahlhybridwerkstoff LITECOR besteht aus einem Polymerkern und zwei Stahldeckblechen im Festverbund [77] [78].

Solche Verbindungen werden im Zerkleinerungsprozess des Schredders nicht hinreichend für eine effektive Nachsortierung aufgeschlossen. Wenig recyclinggerecht konstruiert [12], landen diese duktilen Fragmente in der SSF oder Sorte 4. Interessant ist, dass der Massenanteil der besagten Kunststoffe an der Karosserie heute teilweise weniger als 1 % ausmacht [75].

Der Einsatz hochfester Strukturbauteile im Vormaterial führt des Weiteren zu einer insuffizienten Energiebilanz des Schredderprozesses. Das Material verweilt wesentlich länger im Rotorraum, als herkömmliche Mischschrott- oder Blechfraktionen. Eine Verarbeitung als Monocharge ist i.d.R. ausgeschlossen. Die OEE des Schredders sinkt, das Recycling im Sinne der herstellerorientierten Kreislaufwirtschaft wird erschwert.

Die TRIBOND® Sandwichkonstruktion der Firma ThyssenKrupp Steel Europe AG vereinigt verschiedene Werkstoffeigenschaften von Stählen in einem festen Materialverbund. Bei diesem Verfahren werden duktile und hochfeste Stähle bereits im Warmwalzprozess zu einem funktionsoptimierten Bauteil zusammengefügt [78]. Wenn auch ohne den Einsatz von Kunststoffen, ist diese Entwicklung für den Innovationstrend der letzten zehn Jahre bezeichnend: eine hohe Verformbarkeit und Festigkeit von Struktur- bzw. Konstruktionswerkstoffen bei leichterem Einsatzgewicht. Diese Bewegung verlangt zunehmend nach alternativen Recyclingmethoden oder einer nachhaltigeren Integration des Recyclings in den Produktgestehungsprozess.

Wie nachhaltig der Leichtbautrend im Automobilsektor tatsächlich ist, zeigt die steigende Produktion von Elektroautos. Eine Studie des Center Automotive Research der Universität Duisburg-Essen hat nachgewiesen, dass eine Gewichtsreduktion von 300 kg bei der Elektromobilität auf Grund der Rekuperationsgleichung lediglich einen energetischen Einsparef-

fekt (kWh) von 0,6 bis 4,4 % ausmacht. Der Einsatz prozesskostenintensiver Verbundwerkstoffe zur Gewichtsreduktion im Karosseriebau ist damit vergleichsweise unverhältnismäßig [79].

Für Verbrennungsmotoren ist davon auszugehen, dass der Leichtbau im Exterieur vorerst weiterentwickelt wird. Eine kontinuierliche Substitution metallischer Bauteile durch Kunststoffe (bionische Bauteilformen und Einsatz von Recyclaten) lässt sich in diesem Kontext nicht final prognostizieren [80].

In Zeiten neuer Assistenzsysteme und der Elektromobilität nimmt die Leistungselektronik einen steigenden Anteil im Wertstoffpotential der Kraftfahrzeuge ein. Durch die Produktion von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen halten Bauteile und Rohstoffe Einzug in das Recycling, die in dieser Form und Umfang so bisher nicht dagewesen sind.

Laut einer Studie des Öko-Institut e.V. zu Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität (Synthesepapier), wird der Verkaufsanteil von elektrifizierten Personenkraftfahrzeugen in Abhängigkeit der globalen Erderwärmung, im Jahr 2030 auf 37 % der Gesamtverkäufe im angegebenen Marktsegment steigen. Bis 2050 soll der Verkauf von Verbrennungsmotoren eingestellt sein und nur noch ein Viertel des globalen Fahrzeugbestands ausmachen. Auch für elektrifizierte Zwei- und Krafträder prognostiziert die Studie einen signifikanten Anstieg [81].

Schredderbetreiber beschäftigt in diesem Zusammenhang neben der Verschleppung kunststoffverwandter Komponenten und NE-Metalle aus dem Fahrzeuginterieur bzw. den Fahrzeuginnenausbau in die SSF und SLF, besonders der flächendeckende Einsatz der Lithium-Ionen-Batterien.

Der Umgang mit diesen Energiespeichern an Schredderanlagen als Folge von Fehlwürfen ist brandgefährlich [82] [83] [84] und wird im aktuellen BREF unter dem Themenschwerpunkt Brandprävention an Schreddern, weder untersucht, noch emissionstechnisch bewertet. Wie der Gesetzgeber mit dem Thema zukünftig umgeht und inwieweit die ca. 1.200 in Deutschland zertifizierten Altfahrzeugverwerter [38] bei dem Handling und der ordnungsgerechten Entfrachtung elektrischer Fahrzeuge unterstützen [52], wird sich in den kommenden fünf bis zehn Jahren durch die Dokumentation der Brandereignisse an Schreddern zeigen.

Das Thema ist momentan auch im Rahmen der AltfahrzeugV noch nicht ausreichend gesetzlich geregelt. Die Überarbeitung der EU-Richtlinie ist für das Jahr 2020/21 geplant. Auswirkungen dieser Regelung dürften an Schreddern damit erst ab dem Zeitpunkt 2022/23 spürbar sein.

Grundsätzlich stellt der Einsatz der Traktionsbatterien im Kraftfahrzeug nur einen Bruchteil der entsorgungstechnischen Herausforderungen im Elektronikschrottaufkommen an Schredderanlagen dar. Der steigende Einzug elektronischer Bauteile gepaart mit Kunststoffkomponenten im Konsumgütermarkt oder anderen endverbrauchergesteuerten Industriezweigen, hat einen wesentlich größeren Einfluss auf den Sortenmix, als die derzeit anfallenden Elektrofahrzeuge. Gesetzliche Annahmekriterien ändern sich schneller, als der Produktlebenszyklus alter Elektronikkomponenten, wie die Einführung zum ElektroG2 in Kapitel 2.3.2 zeigt. Der „Open-Scope“-Ansatz des ElektroG2 arbeitet in (neuen) Sammelgruppen, der Schredderbetreiber immer noch wertstromorientiert, also in Hinblick auf die stoffstromgeführten Inhaltstoffe. So werden zukünftig noch mehr Elektroschrotte an deutschen Schreddern landen, die nicht für den massenleistungsfähigen Verarbeitungsprozess geeignet sind.

Kompliziert gestaltet sich die Annahme und Befundung der genannten Inputstoffe genau dann, wenn die kritischen Bauteile vor dem Zerkleinerungsprozess nicht händisch demontierbar sind, was besonders für Autokarosserien, Karosserienpakete, elektrifizierte Zweiräder aber auch kompaktierte Großgeräte aus dem Abfallstrom der Weißen Ware (eigentlich annahmeverweigert und bußgeldbehaftet) o.ä. zutrifft. Weiter verkompliziert sich durch die Fülle an Produkten und Varianten dieser, die Allokation kritischer Stoffe im Vormaterial. Speziell der Umgang mit den Anforderungen an PBDE und DecaBDE kontaminierte Baugruppen in Altkarosserien zeigt, wie komplex und wenig praktikabel das Thema an Schredderanlagen ist [52] [51].

Experten rechnen damit, dass die Mengen der kunststoffproduzierenden Industrie bis zum Jahre 2050 um das Vierfache zum heutigen Niveau anwachsen werden [80] und damit der Anteil komplexer Inhaltsstoffe auch im Vormaterial der Schredderanlagen zwangsläufig steigen wird.

Der PlasticsEurope-Report von 2018 über die Produktion, den Bedarf und Entsorgungsdaten von Kunststoffen in Europa zeigt auf, dass Deutschland als Spitzenreiter 24,6 % des europaweiten Plastikbedarfs im Jahre 2017 abdeckte (21,56 Mt). Wobei anzumerken ist, dass der Großteil der aktuell in Europa im Umlauf befindlichen und verbrauchten Kunststoffe aus der Verpackungsindustrie und dem Bausektor stammen (ca. 50 %), welche für die Entwicklung des schredderspezifischen Stoffstroms weniger von Bedeutung sind.

Die Automobil-, Elektronik- und Haushaltsgerätebranche stellen in Summe nur etwa 20 % des europäischen Kunststoffbedarfs in 2017. Polyolefine decken etwa 50 % des Verbrauchs an Kunststoffen ab. In dieser Gruppe der Thermoplaste macht Polypropylen 19,3 % des Pro-

dukteinsatzes aus. Daneben sind Polyvinylchloride einer der wichtigsten Kunststoffe im europäischen Umlauf (10,2 %) [85]. Im Vergleich zu den Zahlen aus 2011, ist der allgemeine Einsatz von Kunststoffen in den verschiedenen Industriesektoren um ca. 10 % in Europa gestiegen [86].

Diese Entwicklung ist bezeichnend für die zukünftige Zusammensetzung des Inputstroms am Schredder und besonders für das Produktportfolio eine zunehmende Herausforderung (siehe nachfolgend Kapitel 11.4). Unter den in dieser Arbeit gelieferten Informationen werden die Entwicklungen im Vormaterialmix zwangsläufig zu einer Problemstellung der Schredderrückstände.

Durch den Abgleich der SLF-Zusammensetzung diverser aus Sieb- und Sichterversuchen sowie der Ersatzbrennstoffverwertung entsprungenen Analyseergebnisse, findet sich eine Liste an wesentlichen Inhaltstoffen, die sich mit der gemessenen Staubzusammensetzung aus Kapitel 7.3.1 deckt. Tabelle 29 stellt die beiden (Schad-)Stoffanalysen unabhängig ihrer Konzentrationsgrade gegenüber. Auf Grund der großen Übereinstimmung kann eine Verbindung zwischen dem Schadstoffgehalt in der Prozess- und Abluft, sowie der stofflichen Zusammensetzung der SLF hergestellt werden, die wiederum eine Folge des Inputmaterialmix ist. Die Stoffstrombilanzen aus Kapitel 9.2.3.3 und Emissionsergebnisse aus Kapitel 7.3 machen deutlich, dass Menge und Konzentrationsgrad von Schadstoffen (Gesamtstaub und TVOC), speziell bei Karossen, mit dem Anteil der SLF-Verbrennung einhergehen. Und dass der erhöhte Anteil von betriebsflüssigkeitsführenden Bauteilen sowie Kunststoffkomponenten einen nachhaltigen Effekt auf den Schadstoffausstoß an Schreddern hat (in Kapitel 7.2.1.1 des BREF wird ein entsprechender Absatz über den positiven Effekt von Mischschrott auf TVOC-Emissionen an Schreddern formuliert). Die SLF wird folglich zum Indikator für die Emissionsbandbreite an Schreddern.

**Tabelle 29: Vergleich von Inhaltsstoffen in der SLF aus Siebung, Sichtung und der thermischen Verwertung mit gemessenen Staubinhaltsstoffen**

Inhaltsstoffe SLF aus Siebung, Sichtung und Verbrennung		Inhaltsstoffe Staub (Abluft und Deposition)		
Inhaltsstoff	Einheit	Nachweisform	Inhaltsstoff	Einheit
Heizwert	[KJ/kg]	Staubförmige Stoffe in der Abluft	Fe	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Brennwert	[KJ/kg]		Cd, Hg,	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Fe-Anteil	[Masse-%]		As, Pb, Co, Ni,	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
NE-Anteil	[Masse-%]		Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Chlor	[%]	Staubförmige Stoffe als Deposition	Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Ti, V	[mg/(m <sup>2</sup> *d)]
F	[%]		Staubniederschlag (Summe)	[mg/(m <sup>2</sup> *d)]
Schwefel	[%]		Schwebstaub	[µg/m <sup>3</sup> ]
Kohlenstoff	[%]		A-Staub	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Wasserstoff	[%]		E-Staub	[mg/Nm <sup>3</sup> ]
Stickstoff	[%]	-	-	-
Cyanid	[mg/kg]	-	-	-
As, Sb, Pd, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Sn, Zn, Ti, V	[mg/kg]	-	-	-
Hg	[mg/kg]	-	-	-
Chlorbenzol	[mg/kg]	-	-	-
PCB (28, 52, 101, 138, 153, 180)	[mg/kg]	-	-	-
PCB Summe	[mg/kg]	-	-	-

Aktuelle Materialproben und Ausbringungsnachweise der TSR zeigen, dass ein Großteil der betrachteten Schadstoffe in den Schredderrückständen agglomerieren. Spuren von PCB können sowohl in der SLF als auch SSF nachgewiesen werden, wobei eine Verschleppung von PBDE eher in der SSF verzeichnet wird.

In der SLF-fein (Absiebfraktion) werden wesentliche Schwermetalle des SLF-Stroms aufkonzentriert (speziell Zn). In der Grobfraktion finden sich auf Grund von Kabeln und Litzen teilweise hohe Pb- und Cu-Gehalte.

Eine Korrelation zwischen den SLF-Anteilen im Gesamtoutput und den Emissionen an Schreddern lässt sich auf Basis der gelieferten Erkenntnisse, nur anwendungs- oder sortenspezifisch ableiten.

Ein hoher SLF-Anteil spricht für eine qualitativ eher minderwertige Vormaterialkomposition und generell höhere Emissionen, aber meist auch nur in einzelnen Schadstoffen. So führt bei Karossen ein hoher Anteil der SLF-fein i.d.R. zu einem Anstieg der Staubemissionen. Der Anstieg der SLF-grob kann in dieser Sortenklasse (siehe Kapitel 7.3) sehr häufig, aber nicht immer, für erhöhte TVOC-Emissionen stehen. MBA-Schrotte bspw. erzeugen auch sehr hohe SLF-Anteile, sind emissionstechnisch aber eher unauffällig (siehe Abbildung 30). Eine direkte Korrelation aus SLF-Anteilen und Emissionen lässt sich schlussendlich nur für den Bereich der diffusen Staubemissionen festlegen.

Der Mengenzuwachs der SLF ist endlich. Ab welchem Zeitpunkt die Entwicklung stagniert, wird unter Berücksichtigung des fachlichen Themenschwerpunkts in dieser Dissertationschrift weder im Detail ausgearbeitet, noch für weitere Untersuchungen in einem Modell pauschalisiert. Entscheidend ist aber im Gesamtkontext dieser Arbeit und damit auch schlussfolgernd, dass der Einfluss des Vormaterialmix auf die Emissionshöhe- und -bandbreite des Schredders existiert und bereits heute ein wesentliches Entwicklungsfeld an Schreddern darstellt sowie langfristig mit der Änderung der Inhaltsstoffe nicht geringfügiger wird.

Trotz des vergleichsweise geringeren Anteils von Altkarossen im Schredderinput (15 bis 35 % gemäß den gemittelten Produktionszahlen der TSR von 2008 bis 2018) und des daraus resultierenden Emissionskoeffizienten in der Schadstoffgesamtbilanz, sind die Produktentwicklungen des Automobilsektors für Schredderbetreiber wegweisend. Das Innovationspektrum der Automobilbranche hat Einfluss auf andere Industriezweige. So finden Produktdesigns und Werkstoffkompositionen der Automobiler, OEMs und Stahlerzeuger Einzug in andere Sparten, die langfristig den Schredder mit Vormaterial versorgen. Diese Störstoffe gilt es in der Schadstoffbilanz zu berücksichtigen.

Der Trendverlauf in der Werkstoffkunde verdeutlicht darüber hinaus, wie schnelllebig das Thema für den Recycler eigentlich ist. Die Laufzeit kapitalintensiver Großschredderanlagen überlebt i.d.R. diverse Entwicklungstrends. Eine Anpassung auf den Vormaterialmix ist dadurch äußerst prekär und bestärkt das Argument zukünftig auf kleinere Aggregate in Deutschland zu setzen.



In Summe ergeben sich aus den aufgeführten Entwicklungen energetische, effizienz- und emissionstechnische sowie abnehmerbezogene Herausforderungen an Schreddern. Die Flexibilisierung des Aufbereitungsprozesses gestaltet sich dabei als eine mögliche Antwort auf die Kurzweiligkeit der Produktlebens- und Innovationszyklen.

## 11.4 Produktgestaltung im Absatz

Die Produktgestaltung ist auf Grund der individuellen Marktzugänge und Abnehmerstrukturen von Schredderanlagen sehr spezifisch und in sich komplex. Die folgenden Abschnitte reflektieren weder die strategische Zielsetzung der TSR, noch werden sie in ihrem Schwerpunkt der Fülle an Parametern gerecht, die dieses Fachgebiet ausmachen. Die folgenden Entwicklungen und Anforderungen an das Produktportfolio an Großschredderanlagen sind ohne den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen zu wollen, lediglich ein gebündelter Auszug wesentlicher Einflussgrößen, auf die absatzgerichtete Weiterentwicklung von Schredderanlagen im aktuellen und zukünftigen Markt.

Die Entwicklungsrichtung der SLF zeigt, dass der Umgang mit Abfallströmen an Schredderanlagen zukünftig kritischer wird. Das Wachstum produktionshemmender Stoffströme (geringe Ausbringung und Verarbeitungsgewicht, hoher Abfallanteil) fördert den Qualitätsverfall des Schredderoutputs. Steigende Qualitätsanforderungen der Stahlwerke und Hütten wiederum fordern Aufbereitungslösungen, die die Qualitätsschwankungen im Input auffangen. Dabei geht es nicht nur um die Einhaltung der Standards gemäß europäischer Schrottsortenliste, sondern darum Produkte zu entwickeln, die auf die individuellen Anforderungen und metallurgischen Spezifikationen der Abnehmer ausgerichtet sind.

Dieser kundenorientierte Ansatz ist für die Kernoutputfraktion SSF seit Jahren ein geläufiges Mittel. Der Sortenmix im Einkauf, wird auf die spezifische Nachfrage im Absatz abgestimmt. Die Nachfrage kann dabei das Ergebnis eines gemeinsam mit oder für den Kunden erarbeiteten NE-Produktportfolios sein.

Fallen durch den Produktionsrückgang des Verbrennungsmotors (Aluminiumgusslegierungen) in Deutschland, perspektivisch Stoffströme aus, werden neue Absatzwege erforderlich, die ggf. an der ursprünglichen Recyclingroute für den Automobilsektor vorbeiführen.

Die sogenannte „National Sword Policy“ der chinesischen Regierung mit dem Inkrafttreten zum 01. Januar 2018, ist ein weiteres Beispiel für die Flexibilisierung des Absatzes im SSF-Segment. Die strengen Importbeschränkungen auf Feststoffabfälle haben u.a. Einfluss auf die Zorba-Qualität an Schreddern (Weigerung von Leiterkarten und diversen Kunststoffen).

Sie fordern Reinheitsgrade von 99,5 % [87], die nur durch eine technologische Verbesserung des Sortierprozesses und/oder erhöhten Aufwand in der händischen Nachsortierung zu bewältigen sind.

Der Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft aus dem Jahre 2018 definiert die Kernaufgabe von Recyclingunternehmen in erster Linie darin, die stofflichen Potentiale von Abfällen zu nutzen und die daraus gewonnenen Wertstoffe dem Produktgestehungsprozess wieder zur Verfügung zu stellen [6]. Für einen durchsatzgesteuerten Schredderprozess ist die Qualitätskonstante im Eingangsmaterial dafür entscheidend (siehe rückwirkend auch Abbildung 80). Ohne geeignete Vorkonditionierung oder Werthaltigkeit des Inputs, wird der Qualitätsanspruch des Abnehmers nicht getroffen, bzw. Stoffstrompotentiale auf Grund der teilweise starren Aufbereitungskette nur anteilig gehoben.

Die Wertschöpfungstiefe am Schredder ist demnach direkt mit dem Absatz gekoppelt (siehe Kapitel 4.1). Ohne einen konkreten Abnehmer, erübrigt sich die Frage nach Menge und Aufbereitungsgüte bzw. Qualität. Obwohl das „Downcycling“ in dieser Gleichung im Sinne der Nachhaltigkeit keine echte Option oder Variable darstellt (geläufiger Effekt beim Recycling von Aluminiumschrotten von Primär- zu Sekundärqualitäten). Die willkürliche Abhängigkeit des Schredderbetreibers vom Markt, gilt es mit einer Produktpartnerschaft zu überwinden und damit dem eigentlichen Anspruch der „Circular Economy“ gerecht zu werden [6].

Die Fortschreibung dieses Individualisierungstrends findet mittlerweile auch Einzug in den Sorte 4-Stoffstrom. Die Anzahl der am Markt angebotenen Produktvarianten wird u.U. zukünftig auch hier steigen, während die im Mittel konsumierten Mengen je Variante sinken [35].

Für Schredderbetreiber ist dieser Ansatz in der E40-Route insofern neu, dass zukünftig nicht nur mechanische Eigenschaften (Schüttgewicht, Form, Durchmesser) und Reinheitsgrad der Fraktion (keine Anhaftungen, Schmutz oder sonstige Abwertungs- und Weigerungskriterien) ihren Wert bestimmen, sondern vermehrt die chemisch-metallurgische Zusammensetzung (Legierungsbestandteile) [12].

Die aktuellen Diskussionen um den Einsatz von Wasserstoff als alternatives Reduktionsmittel zum Kohlenstoff in Elektrostahlwerken und integrierten Hüttenwerken [88] [89] in Deutschland, führt dazu, dass Stahlschrott allgemein aber besonders die Sorte 4 für die Qualitätsstahlproduktion, in den Fokus der Branchenvertreter gerät.

Aktuell werden 70 % des Stahls in Deutschland über die Hochofen-Konverterroute erzeugt [5]. Durch die Zielsetzungen des Pariser Abkommens zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und dem Ausbau der erneuerbaren Energien, wird ein Wechsel der Verwertungsrouten unter dem Einsatz des alternativen Reduktionsmittels, zunehmend attraktiver.

6 % der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen (51 Millionen t CO<sub>2</sub>) in Deutschland rühren aus der Stahlindustrie. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Oxygenstahlverfahren belaufen sich auf 1.725 kg/t, die des Elektrostahls auf lediglich 400 kg CO<sub>2</sub>/t Rohstahl. Die Dekarbonisierung der Stahlproduktion über den Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff, könnte eine der zukünftigen Schlüsseltechnologien für die kohlenstoffarme Stahlerzeugung werden. Eisenerz würde dann in einer Schachtofen-Direktreduktionsanlage mit Wasserstoff reduziert und das direkt-reduzierte Fe (Eisenschwamm) im Elektrolichtbogen unter Verwendung CO<sub>2</sub>-neutralem Stroms in Rohstahl umgewandelt. Ob die Konverter- durch die rein schrottbasierte Elektrofenroute abgelöst wird, hängt von dem Umfang staatlicher Subventionierungen, den zukünftigen regenerativen Energiekosten, der Verfügbarkeit und dem Qualitätsgefüge im Stahlschrott sowie der Notwendigkeit des Primärmaterials für gewisse Stahlqualitäten ab [90] [91]. Vom heutigen Standpunkt aus, darf weiter von einer Parallelität der beiden Verfahren ausgegangen werden [92].

Entscheidend ist aus Sicht der Recycler, dass durch den klimaschutzgesteuerten Rückgang der klassischen Hochöfen-Konverterroute, der Einsatz von Schrotten in der Stahlerzeugung in Deutschland wesentlich steigen wird. Unterstützt wird diese Haltung durch eine Studie des Fraunhofer-Instituts über volkswirtschaftliche Wohlfahrtsgewinne in Folge der Reduzierung der allgemeinen Umweltbelastung, durch den vermehrten Einsatz von Stahlschrotten in Stahlwerken. Mit Hilfe des sogenannten „Schrottbonus“ sollen monetäre Anreize geschaffen werden, die Nachfrage, sprich den prozentualen Anteil von Schrotten in der Stahlerzeugung, im Rahmen der technischen Möglichkeiten, auf ein volkswirtschaftliches Optimum zu heben [93].

Ein erhöhter Einsatz von Sekundärrohstoffen setzt dann u.a. neue metallurgische Standards für die Sorte 4, da der Qualitätsverlust in der Rohstahlerzeugung beim Elektrolichtbogenofen, durch den unkontrollierten Eintrag von Cu, Ni oder Sn, signifikant ist. Zukünftig wäre damit eine direkte Rückkopplung der Legierungsbestandteile aus dem Sorte 4-Stoffstrom während der Schredderproduktion notwendig. Eine verlässliche Kontrolle/Analyse der Legierungsbestandteile bzw. Begleitelemente und ihrer Massenanteile der E40 (speziell Fe, Cr, Cu, Mn, Silizium (Si), Mo, Ni, Ti, Sn und Zn (Filterstaubproblematik)) [12] führt zu

einer verbesserten Vermarktung und Vermeidung von Reklamationen/Weigerungen gegenüber den Stahlwerken. Sortierleistungen können inline abgeprüft und die Metallurgie der E40 durch Beimengung im Input angepasst werden.

Die Vielfalt an Konstruktions- und Funktionsbauteilen, die Miniaturisierung dieser [12] sowie der zunehmende Anteil an kleinen Elektromotoren erhöht den Cu-Gehalt im Schredderschrott zunehmend. Die Cu-Kontamination im Fe wird global und besonders in Bezug auf Qualitätsstähle diskutiert und zunehmend zur Aufgabenstellung der Schrottreycler [94]. So wird mit Hilfe prozesstechnischer Anpassungen (u.a. Kapitel 9.2.3.2) und der aktiven Konditionierung des Vormaterials, das zukünftige Portfolio im Sorte 4-Massenstrom neu aufgelegt. Als Folge des genannten Technologiewandels, könnte die Sorte 4 dann, und entsprechend ihrer metallurgischen Zusammensetzung, in Untersorten kategorisiert werden (Sorte 4.1, 4.2 usw.). Gemäß den ökonomischen Randbedingungen bei der Produktmodellierung der SSF und analog dem Gießereimarkt, in dem die Preisgestaltung an die Einhaltung maximaler Legierungsbestandteile gekoppelt ist, wäre auch hier ein entsprechendes Vergütungsmodell zwischen Erzeuger und Abnehmern erforderlich. Des Weiteren darf nicht unberücksichtigt bleiben, inwiefern Konjunkturreffekte (bspw. die Flachstahlproduktion für die Automobilindustrie) die Branche langfristig beeinflussen und damit die Entwicklungsbereitschaft in der Kreislaufwirtschaft einschränken (siehe Kapitel 4.1).

Durch die Zunahme der SLF-Mengen und das unkontrollierbare Preisgefüge wird die Entsorgung wertstoffarmer Fraktionen an Schreddern in Zukunft noch mehr ins Gewicht fallen. Die ökologischen und ökonomischen Randbedingungen bzw. Optionen in der SLF-Verwertung, gestalten die betrieblichen Strategien der Schredderbetreiber langfristig (siehe rückwirkend auch Abbildung 79).

Die Reaktionsgeschwindigkeit im deutschen Recycling ist i.d.R. höher, als die Bergwerksinbetriebnahme. Der steigende Anteil der Kunststoffkomponenten ist im Kontext der SLF-Mengensteigerung wenig zielführend und bestärkt den Weg der dezentralen Aufbereitung an Schreddern. Wo die SSF oder Sorte 4 die Zunahme der Kunststoffe als wertstoffliches Defizit verzeichnen, stellt die Verschleppung dieser in die SLF einen energetischen Zugewinn dar. Die Separation von Kunststoffen in der SLF-Linie wird an Schreddern langfristig unumgänglich. Im Zuge dessen besteht die Kernaufgabe der Schredderbetreiber weniger in der Installation einer ausgereiften, kapital- und betriebskostenintensiven Recyclingstufe für qualitätsgeminderte Thermoplaste [12], als vielmehr in der Aufkonzentration recyclingfähiger Kunststoffmischfraktionen. Eine kunststofflastige Übersortierung kann dabei helfen,

den kalorischen Wert der SLF-Verbrennung systemkritisch abzusenken (kleiner 12 bis 15 MJ/kg) und die Annahme in den Verbrennungsanlagen zu erleichtern.

Die Vermarktung vermischter Kunststoffe aus dem Schredderprozess, fordert den vorgeschalteten Stoffströmen im Output entsprechend, ein nachhaltiges Absatzkonzept.

Inwiefern sich die händische Demontage [12] von kunststoffhaltigen Komponenten an Altkarosserien langfristig und in welchem Umfang (Kosten-Nutzen-Effekt) [95] durchsetzen wird, ist dabei auch für Schredderbetreiber entscheidend. Je höher die Entfrachtungsrate von Fe- und NE-freien Bauteilen vor dem Schredder, desto höher die Rückführung in hochwertigeres Recycling oder die Wiederverwendung dieser. Entsprechend geringer sind dann auch die Reststoffe in der Entsorgung.

Zuzüglich der vorgestellten Aufbereitungslösungen in Kapitel 9.2.3.3 und unabhängig der angeführten Kunststoffproblematik, kann die Konditionierung der Abfallströme für den Weg der Deponie oder Verbrennung durchaus dort eine Lösung sein, wo fraktionsspezifische Anomalien, wie Schwermetallkonzentrationen oder Glühverluste eine Verwertung erschweren. Auch in diesem Fall ist eine transparente Zusammenarbeit mit den Entsorgern erfolgswördernd.

Die Produktindividualisierung wird schließlich zum Kernthema der Produktgestaltung an Schredderanlagen und schließt den siebten Kerneinflussfaktor im Systemkonzept zur Weiterentwicklung von Schredderanlagen ab. Der ökologische und ertragsfördernde Umgang mit komplexen Inhaltsstoffen liegt schlussendlich nicht allein im Schredderinput. Aufbereiter haben die Pflicht stoffliche Qualitäten zu erhalten und den Abnehmern Materialkompositionen zu präsentieren, die individuell auf die Anforderungen des Verwerters angepasst sind. Weiter besteht die Möglichkeit den Recycler aktiv in die Werkstoffgestaltung einzubinden und Produkte zu entwickeln, die nachhaltig in eine zukunftsweisende Kreislaufwirtschaft eingebunden sind.

## 12 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptziel dieser Arbeit war die methodische Ausarbeitung eines Systemkonzepts zur Weiterentwicklung von Autoschredderanlagen im Metall- und Schrottreycling, unter dem Einfluss umweltschutzrechtlicher Änderungen.

Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei in der Zusammenführung formalrechtlicher, verfahrenstechnischer und wirtschaftswissenschaftlicher Aspekte, die dem Umweltschutz an Großschreddern dienlich sind. Über diesen interdisziplinären Ansatz sollte ein möglichst umfassendes Verständnis des Themenkomplexes „Schredderanlagen“ generiert und eine Basis für die Argumentation der zukunftsweisenden „Advanced Circular Economy“ an Schredderanlagen geschaffen werden.

Hierzu wurden im Grundlagenteil der Arbeit zuerst die rechtlichen nationalen und europäischen Rahmenbedingungen für die Anzeige, den Betrieb und die Stilllegung von Schredderanlagen in Deutschland ausgearbeitet. In Folge des ablufttechnischen Schwerpunktes, lag der wesentliche Fokus dabei in der Zusammenfassung des BREF für Abfallbehandlungsanlagen und der TA Luft.

Ergänzend dazu wurden technische Grundlagen zu Schreddern geliefert und diese im Kontext stoffstrom- und mengenbasierter Parameter aufgeschlüsselt. Eine wesentliche Erkenntnis der technischen Grundlagenermittlung lag dabei in der Entkopplung des Schredders vom klassischen Begriff der Aufbereitung, hin zu einer produktionstechnischen Ausrichtung im Sinne der Produkt- und Teilefertigung.

In Verbindung mit den betriebswirtschaftlichen Grundlagen, ließ sich der fertigungsgeprägte Ansatz des Schredderprozesses weiter ausbauen. Neben marktrelevanten Einflussgrößen, wurden hier besonders controlling- und leistungskennzahlenbasierte Parameter für die Wirtschaftlichkeitsbestimmung von Schredderanlagen zusammengestellt.

Die fachgebietsübergreifende Untersuchung des Schredderprozesses hat gezeigt, dass formalrechtliche Änderungen im Umweltschutz, tiefgreifend in allen Bereichen des Recyclinggeschäfts Einfluss nehmen. Und darüber hinaus Potentiale in der Weiterentwicklung von Schredderanlagen als Teil der Kreislaufwirtschaft Deutschlands und dem Zeitalter der Industrie 4.0 wecken.

Der übergeordnete Systemansatz verfolgt infolgedessen die Theorie, dass die novellierten Emissionsgrenzwertbestimmungen des BREF und der TA Luft für Schredderanlagen, direkten oder indirekten Einfluss auf die technischen und betrieblichen Bestandsprozesse

nehmen und strategische Managemententscheidungen der Betreiber im Kontext einer Anlagenneuplanung nachhaltig beeinflussen. Geprägt wird dieser Effekt durch den wertstofflichen Verfall des Mengenstroms an Schreddern, in einem fallenden Absatzmarkt, bei steigenden Entsorgungskosten sowie -mengen der SLF und den emissionstechnischen Auswirkungen in Folge des Vormaterialmix.

Die Zusammenführung der einzelnen Fachdisziplinen in einem systemimmanenten Kreislaufmodell half dabei, die wesentlichen Kerneinflussfaktoren auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen im genannten Kontext zu identifizieren sowie organisatorische, technische und strategische Lösungen zum Umgang mit den formalrechtlichen Herausforderungen aufzuzeigen.

Insgesamt wurden sieben Kerneinflussfaktoren im übergeordneten Systemkonzept ausgearbeitet. Diese erstrecken sich von der „Europäischen und nationalen Gesetzgebung“ im Umweltrecht und der „Bestandsgenehmigung“ an Schreddern, über „Emissionsgrenzwerte und Messungen“ sowie die „Bestandstechnik“, gefolgt von den wesentlichen „Technologien und Innovationen“ des untersuchten Themenkomplexes. Weiter werden „Umwelt- und Genehmigungsbehörden“ sowie das „Vormaterial und Produkt“ als die entscheidenden Einflussgrößen der Weiterentwicklung von industriellen Großschredderanlagen im Schrottreycling definiert und fachspezifisch ausgearbeitet.

Der erste Schritt in der Ausarbeitung des Systemkonzepts lag in der Analyse und anschließenden Zusammenfassung des aktuellen BREF für Abfallbehandlungsanlagen und des TA Luft-Entwurfes vom 16. Juli 2018 in einem Leistungsverzeichnis für Schredder. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich speziell mit dem perspektivischen Inkrafttreten der TA Luft-Novelle, der umweltschutzrechtliche Rahmen für Schredderanlagen im Bereich der gasförmigen und diffusen Emissionen in die Luft, verschärfen wird. In Summe bildet das neue formalrechtliche Anforderungsprofil sowohl grenzwertspezifische, als auch betriebliche Umweltschutzmaßnahmen ab und nimmt einen bisher nicht dagewesenen Einfluss auf die Betriebsführung von Schredderanlagen.

Kritisch werden in diesem Zusammenhang besonders die verschärfte Grenzwerte für die TVOC von 50 mg/Nm<sup>3</sup> und Bagatellmassenströme in der Abluft des Schredders sowie der erhöhte Verwaltungsakt im Umgang mit dem UMS und die Überlagerung von Rechtsvorschriften bewertet. In Folge der wesentlichen Änderung im genehmigten Altbestand, kann so ein echter Wettbewerbsnachteil für deutsche Schredder im europäischen Vergleich entstehen.

Eine historische Datenanalyse von emissions- und immissionstechnischen Messprojekten, half im zweiten Schritt der Forschungsarbeit bei der Identifikation von emissionsbegünstigenden Stoffströmen und der Gewichtung der novellierten Grenzwertbestimmungen. Die selektierten Messprojekte der letzten 43 Jahre an Schreddern der TSR Gruppe, weisen signifikante Abhängigkeiten der Emissionskonzentrationen – speziell für den Gesamtstaub- und TVOC-Gehalt – sowie ihrer Bandbreite an Schredderanlagen, in Bezug auf den verarbeiteten Materialstrom nach. Durch die segregierte Auswertung und Einbindung einer Langzeitstudie zur Messung der TVOC-Konzentrationen, in Abhängigkeit der Vormaterialkomposition und Ereignisse, konnte schlussendlich nachgewiesen werden, dass die Einhaltung der formalrechtlichen Forderungen für die Abluft an Schreddern, mit der aktuellen Bestandstechnik nicht zu gewährleisten ist und entsprechende Verfahrensverbesserungen an Altanlagen erforderlich sein werden.

Des Weiteren lieferte die Auswertung der historisch erfassten Staubinhalstoffe die Grundlage für die abschließende Plausibilisierung über den Anstieg der Emissionen an Schredderanlagen in Folge des wertstofflichen Verfalls im Schreddervormaterial.

In dieser Phase der Arbeit wurde ergänzend untersucht, welche mess- und verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um eine Weiterentwicklung des Emissionsschutzes an Schredderanlagen nachhaltig zu planen.

Aus dem Abgleich der messtechnischen Beurteilung mit dem rechtlichen Rahmen, ließ sich schließlich das technische Anforderungsprofil für den Schredder der Zukunft ableiten. In diesem dritten Abschnitt des Forschungsprojektes wurden weitreichende Konsequenzen für den Anlagenbau und das UMS an Schreddern eruiert und in Bezug auf ihre Machbarkeit bewertet.

Eine wesentliche Erkenntnis aus der Evaluation ist die Notwendigkeit der gesamtheitlich messtechnischen Erfassung und Reduzierung der quellgebundenen und diffusen Emissionen an Schredderanlagen und ihren Produktionseinheiten. Dieser Umstand hat zur Folge, dass der Umweltschutz an Schreddern flächendeckend betriebliche und verfahrenstechnische Maßnahmen fordert, die unter Berücksichtigung des Wertstromverfalls u.U. zum wirtschaftlichen Gesamtschaden einer Unternehmung führen können. Diese ökonomischen Auswirkungen wiederum, galt es im Zuge einer Anlagenneuplanung risikotechnische bewertbar zu machen.

Die Entwicklung eines Systemtools zur Datenerhebung und Evaluation von Betriebskennzahlen war im Zuge dessen ein lösungsorientierter Ansatz, den Schredderbestandsprozess transparent monetär und nicht-monetär abzubilden und die Effekte einer Anlagenerweiterung im Investitionscontrolling zu simulieren. Die Anwendung des Schreddertools formte in



Rückkopplung mit dem technischen Lastenheft, schließlich die Grundlage für die Priorisierung verfahrensrelevanter und betrieblicher Entwicklungsfelder im Planungsprozess.

Die herausgearbeiteten Entwicklungsfelder wurden im vierten Abschnitt dieser Arbeit, in Form einer Konzeptstudie über die Planung und perspektivische Umsetzung einer Schredderanlage für Konsumgüterschrott, Altfahrzeuge und Komplexschrotte, unter den formalrechtlichen und genehmigungstechnischen Rahmenbedingungen untersucht und in operativen Teilprojekten zur TVOC-Reduktion, Sortiertechnik und Prozessdigitalisierung priorisiert und anschließend umgesetzt.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Studie lag dabei in der technischen, als auch monetären Bewertung von zukunftsweisenden Abluftreinigungssystemen. Im Ergebnis der Studie weisen alle untersuchten Abluftreinigungstechniken, unter konsequenter Anwendung des neuen Anforderungsprofils, heute noch Entwicklungsfelder auf, die es im Zuge weiterer Forschungsarbeiten selektiv zu lösen gilt.

In Hinblick auf das Abfall- und Stoffstrommanagement sowie die Ressourcen-/Reststoff- und Energieeffizienzplanung des UMS, wurden solche Technologien in der Sortiertechnik untersucht, die positiven Einfluss auf die OEE und die Verwertungsmengen an Schreddern nehmen (u.a. die dezentrale SLF-Aufbereitung).

Systeme zur Störstofferkennung (Schwerteile, Batterien und Hohlkörper), automatisierte Sortier- und Analyseeinrichtungen in der Sorte 4 sowie die Prozessdigitalisierung des Schredderbetriebes im Sinne des „Big-Data-Managements“ in der Betriebs- und Warenwirtschaft, gelten als zukunftsweisende Technologien und werden als innovative Lösungen für den Umweltschutz an Schredderanlagen zukünftig und als Folge der in dieser Arbeit durchgeführten Entwicklungen und Wirtschaftlichkeitsbewertungen, bei der TSR weiterverfolgt.

Im letzten, aber entscheidenden Teilschritt dieser dreijährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit bei der TSR, wurde der zentrale Kerneinflussfaktor auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen, unter den gegebenen Randbedingungen untersucht.

Hier wurden die Erkenntnisse aus den durchgeführten und evaluierten Abluftmessungen mit der mengen- und preistechnischen Entwicklung der SLF von zehn Schredderanlagen der TSR-Gruppe, über den Zeitraum von 2010 bis 2018 zusammengeführt und für die Argumentationskette des übergeordneten Systemkonzepts herangezogen.

Die Ergebnisse weisen einen signifikanten Anstieg der SLF-Quoten im Output des Schredders in Folge der sich verändernden Materialzusammensetzung und Zunahme der Störstoffanteile im Stoffstrom der Schredderroute nach; wenn auch die untersuchten emissions-

und werk- bzw. wertstoffkritischen Produktinnovationen aus dem Automobilsektor sowie produzierenden Gewerbe, erst in zehn bis 15 Jahren vollen Einzug in den Schredderprozess erhalten werden.

Ergebnistechnisch lässt sich darüber hinaus ausführen, dass das Vormaterial wesentlich zur Emissionsbandbreite an Schreddern beiträgt und steigende SLF-Mengen ein Indikator für den Wertstoffverfall im Schreddervormaterial sind. Aus dieser Gleichung heraus, spricht eine hohe SLF generell für höhere Emissionen am Schredder, aber meist auch nur in einzelnen Schadstoffen und muss daher immer im Zusammenhang mit der verarbeiteten Sortenklasse betrachtet werden.

Grundsätzlich lässt sich im Rahmen des entwickelten Systemkonzepts festhalten, dass die Anpassungen der formalrechtlichen Umweltschutzanforderungen an Schredderanlagen, in der Konstellation aus stagnierenden, teilweise fallenden deutschen und europäischen Absatzmärkten, bei der stofflichen Veränderung des Inputmaterials, mit einer starken Tendenz zu sinkender Wertstoffausbringung und den steigenden Qualitätsanforderungen der Abnehmer, zu einem vergleichsweise ungünstigen Zeitpunkt kommen.

Aus der Prämisse neuer umweltschutzrechtlicher Grenzwertbestimmungen heraus, werden Schredderbetreiber dazu bewegt, ihre Wirtschaftlichkeit unter betriebs- und verfahrenstechnischen Gesichtspunkten zu bewerten und über den Fortbestand der altgedienten Techniken zu entscheiden.

Die digitale Vernetzung von Betriebs- und Maschinendaten, sowie Informationen aus der Warenwirtschaft, ist ein valider Weg den Schredderprozess in dieser Entscheidungsphase transparent auszulegen und für das volatile Marktgeschehen flexibel zu gestalten. Im Zuge dessen, kann der Schredderbetreiber zum Innovationstreiber der Schrottbranche werden.

Das Recycling an Schredderanlagen ist heute noch ein reaktives Wertschöpfungsmodell und dafür ausgelegt, abnehmergelenkt, sehr komplexe Schrotte aufzubereiten. Wenn dieser Aufbereitungsprozess zunehmend durch steigende Entsorgungskosten, Ausbringungsverluste sowie Absatzschwierigkeiten geprägt ist und seine Verluste nicht ertragsgerecht im Markt umgelegt bekommt, kann das Konzept des (Groß-)Schredders, wenn konservativ weitergelebt, langfristig in Deutschland scheitern.

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] Schnitzer G, Willeke R. World Steel Recycling in Figures 2014 - 2018: Steel Scrap – a Raw Material for Steelmaking; 2019. Online unter URL: <https://bir.org/assets/Documents/publications/brochures/World-Steel-Recycling-in-Figures-2014-2018.pdf> [Abruf: 19.11.2019].
- [2] Schmiedel W, Willeke R. World Steel Recycling in Figures 2011 - 2015: Steel Scrap - a Raw Material for Steelmaking; 2016. Online unter URL: <https://bir.org/assets/Documents/publications/brochures/160160-Ferrous-report-update-FIN-4-WEB.pdf> [Abruf: 19.11.2019].
- [3] Bird T, Willeke R. World Steel Recycling in Figures 2013 - 2017: Steel Scrap – a Raw Material for Steelmaking; 2018. Online unter URL: <https://bir.org/assets/Documents/publications/brochures/180222-Ferrous-report-2017-V07.pdf> [Abruf: 19.11.2019].
- [4] Hiebel, Markus, Schwenter, Andreas. Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott: Ergebnisse der Fraunhofer Umsicht-Studie zur Zukunft des Stahlschrotts; 2018. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Zukunft\\_Stahlschrott\\_2\\_Auflage.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Zukunft_Stahlschrott_2_Auflage.pdf) [Abruf: 19.11.2019].
- [5] Wirtschaftsvereinigung Stahl. Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2019; 2019. Online unter URL: [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl\\_Fakten\\_zur\\_Stahlindustrie\\_2019.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl_Fakten_zur_Stahlindustrie_2019.pdf) [Abruf: 19.11.2019].
- [6] Birnstengel B, Eckhardt M, Häusler A, Hoffmeister J, Labinsky A, Lambert J et al. Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft: Einblicke und Aussichten 2018; 2018. Online unter URL: [https://www.prognos.com/uploads/tx\\_atwpubdb/Prognos\\_Statusbericht\\_2018.pdf](https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/Prognos_Statusbericht_2018.pdf) [Abruf: 19.11.2019].
- [7] Schlacke S. Umweltrecht. Baden-Baden: Nomos-Verlagsgesellschaft; 2019.
- [8] Wagner S. Umsetzung der EU-Industrieemissionsrichtlinie (IED) und neue Anforderungen an Unternehmen. Online unter URL: [https://www.karlsruhe.ihk.de/innovation/umwelt/Immissionen/Umsetzung\\_der\\_EU\\_Industrieemissionsrichtlinie\\_IED\\_und\\_neue\\_Anfo/2454796](https://www.karlsruhe.ihk.de/innovation/umwelt/Immissionen/Umsetzung_der_EU_Industrieemissionsrichtlinie_IED_und_neue_Anfo/2454796) [Abruf: 04.08.2019].

- [9] Wagner S. IHK Merkblatt: Die Umsetzung der Industrieemissionsrichtlinie - neue Pflichten für industrielle Großbetriebe; 2017. Online unter URL: <https://www.schaumburg.de/assets/pdf/mter/Amt-63/UmsetzungEU-Industrieemissionsrichtlinie-Merkblatt-IHK.pdf> [Abruf: 02.03.2019].
- [10] Kalmbach S. Stand der Technik und Anwendung der BVT-Dokumente im Anlagenzulassungsrecht. In: Thomé-Kozmiensky KJ, Hrsg. Immissionsschutz. Neuruppin: TK-Verlag; 2011. 285–95.
- [11] Kraus K, Leuthold S, Reichart A. Wegweiser Beste Verfügbare Techniken Made in Germany: Machen Sie Ihre Umwelttechnik zum europäischen Maßstab!; 2015. Online unter URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wegweiser\\_beste\\_verfuegbare\\_techniken\\_made\\_in\\_germany\\_2015.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wegweiser_beste_verfuegbare_techniken_made_in_germany_2015.pdf) [Abruf: 13.04.2019].
- [12] Martens H, Goldmann D. Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016.
- [13] Gruber JT, Wittmann A. Umweltmanagementsysteme. In: Kurth P, Oexle A, Faulstich M, Hrsg. Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2018. 265–93.
- [14] Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling - und Entsorgungsunternehmen e. V. BREF für Großschredderanlagen: Standpunkt der deutschen Schredderwirtschaft; 2012. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/branche/BREF\\_Grossschredder.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/branche/BREF_Grossschredder.pdf) [Abruf: 06.03.2019].
- [15] Geesmann R. Anlagengenehmigung. In: Kurth P, Oexle A, Faulstich M, Hrsg. Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2018. 157–78.
- [16] Umweltbundesamt. Luftreinhaltung: Leitfaden zur Emissionsüberwachung; 2008. Online unter URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3416.pdf> [Abruf: 12.09.2019].
- [17] Kalmbach S. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft): TA Luft mit Erläuterungen; Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Berlin: Erich Schmidt; 2004.
- [18] Bureau of International Recycling aisbl. Shredder Committee: China's shredder population surges to just short of US levels, latest statistics reveal; 2019. Online unter URL: <https://bir.org/news-press/press-releases/recent-bir-world-recycling-convention-and->

- exhibition-in-singapore-shredder-committee-chinas-shredder-population-surges-to-just-short-of-us-levels-latest-statistics-reveal/ [Abruf: 19.11.2019].
- [19] Carl N, Fiedler R, Jórasz W, Kiesel M. *BWL kompakt und verständlich: Für Studierende von Ingenieurs- und IT-Studiengängen sowie für Fach- und Führungskräfte ohne BWL-Studium*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2017.
- [20] Westkämper E, Decker M. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2006.
- [21] Wildemann H. *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung*. München: gfmt; 1988.
- [22] Nedeß C, Mallon J, Strosina C. *Die Neue Fabrik: Handlungsleitfaden zur Gestaltung integrierter Produktionssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1995.
- [23] Hoitsch H-J. *Produktionswirtschaft: Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre*. München: Vahlen; 1985.
- [24] Krafczyk T, Goldmann D. Der Einfluss von umweltrechtlichen Änderungen auf die Weiterentwicklung von Schredderanlagen. *World of Metallurgy - ERZMETALL*, 71(4); 2018. 215–20.
- [25] Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling - und Entsorgungsunternehmen e. V. *Europäische Stahlschrottsortenliste*; 1995. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/service/gesetze\\_und\\_regelwerke/sortenliste\\_eu.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/service/gesetze_und_regelwerke/sortenliste_eu.pdf) [Abruf: 06.12.2019].
- [26] Weißbach W, Dahms M, Jaroschek C. *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2018.
- [27] Kranert M. *Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung - Recht - Verfahren*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2017.
- [28] Görner K, Hübner K. *Gasreinigung und Luftreinhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2002.
- [29] Ebeling N. *Abluft und Abgas: Reinigung und Überwachung*. Weinheim: Wiley-VCH; 1999.
- [30] Batel W. *Entstaubungstechnik: Grundlagen Verfahren Meßwesen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1972.
- [31] Förtsch G, Meinholz H. *Handbuch Betrieblicher Immissionsschutz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013.

- [32] Schwister K, Leven V. Verfahrenstechnik für Ingenieure: Lehr- und Übungsbuch. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.; 2014.
- [33] Nicola L. Werner. Aktivkohle und ihre Anwendung; 2014. Online unter URL: <https://www.donau-carbon.com/getattachment/943783b7-783d-45ef-98de-392817d477da/aktivkohle.aspx> [Abruf: 05.10.2019].
- [34] Peters N, Nunge S, Geldermann J, Rentz O. Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland: Teilband I: Lackverarbeitung; 2002. Online unter URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3217.pdf> [Abruf: 03.10.2019].
- [35] Kellner F, Lienland B, Lukesch M. Produktionswirtschaft: Planung, Steuerung und Industrie 4.0. Berlin: Springer Gabler; 2018.
- [36] Hüne T. Industriebericht: Industrieproduktion und Handel nach Branchen November 2019; 2019. Online unter URL: <https://bdi.eu/publikation/news/industriepolitik-dossier-11-2019/> [Abruf: 14.12.2019].
- [37] Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling - und Entsorgungsunternehmen e. V. Deutsche Stahlrecycling-Bilanz 1980 bis 2018; 2017. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/user\\_upload/Deutsche\\_Stahlrecyclingbilanz\\_1980\\_2018.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/Deutsche_Stahlrecyclingbilanz_1980_2018.pdf) [Abruf: 14.12.2019].
- [38] Umweltbundesamt. Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib; 2019. Online unter URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#textpart-1> [Abruf: 14.12.2019].
- [39] Spindler G-I. Basiswissen Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Quick Guide für (Quer-) Einsteiger, Jobwechsler, Selbstständige, Auszubildende und Studierende; 2017.
- [40] Daum A, Greife W, Przywara R. BWL für Ingenieurstudium und -praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2018.
- [41] Gottmann J. Produktionscontrolling: Wertströme und Kosten optimieren. Wiesbaden: Springer Gabler; 2016.
- [42] Weber J, Bramsemann U, Heineke C, Hirsch B. Wertorientierte Unternehmenssteuerung: Konzepte - Implementierung - Praxis-Statement. Wiesbaden: Springer Gabler; 2017.
- [43] Behringer S. Konzerncontrolling. Berlin: Springer Gabler; 2018.

- 
- [44] Becker T. Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. Berlin: Springer; 2005.
- [45] Nickenig K. Grundkurs Kosten- und Leistungsrechnung: Schneller Einstieg in die unternehmerische Kalkulation. Wiesbaden: Springer Gabler; 2017.
- [46] Heinen E. Industriebetriebslehre: Entscheidungen im Industriebetrieb. Wiesbaden: Gabler Verlag; 1991.
- [47] Focke M, Steinbeck J. Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management: Definitionen, Vorgehen und Methoden – von manuell bis Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Gabler; 2018.
- [48] Gutenschwager K, Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S. Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer Vieweg; 2017.
- [49] Krafczyk T, Goldmann D. Systemkonzeptionierung in der Planung von Großschredderanlagen unter dem Einfluss umweltrechtlicher Veränderungen. In: Thiel S, Holm O, Thomé-Kozmiensky E, Goldmann D, Friedrich B, Hrsg. Recycling und Rohstoffe. Neurruppin: TK-Verlag; 2019. 521–30.
- [50] Behnke A, Bönnhardt A, Bussian BM, Blondzik K, Dauert U, Fettig I et al. Dioxine und dioxinähnliche PCB in Umwelt und Nahrungsketten; 2017. Online unter URL: [https://www.dioxindb.de/dokumente/Dioxine\\_und\\_Dioxinaehnliche\\_PCB\\_in\\_Umwelt\\_und\\_Nahrungsketten.pdf](https://www.dioxindb.de/dokumente/Dioxine_und_Dioxinaehnliche_PCB_in_Umwelt_und_Nahrungsketten.pdf) [Abruf: 09.09.2019].
- [51] Zangl S, Blepp M, Marquardt M, Moch K, Wirth O. Nationale Umsetzung des Stockholmer Übereinkommens zu persistenten organischen Schadstoffen (POPs): PBDE und PFOS in Erzeugnissen und im Recyclingkreislauf; 2012. Online unter URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/3710\\_63\\_415\\_stockholm\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/3710_63_415_stockholm_bf.pdf) [Abruf: 09.09.2019].
- [52] Mehlhart G, Möck A, Goldmann D. Effects on ELV waste management as a consequence of the decisions from the Stockholm Convention on decaBDE; 2018. Online unter URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/ACEA-DecaBDE-final-report.pdf> [Abruf: 09.09.2019].
- [53] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Anpassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft; 2019. Online unter URL:

- [https://www.bmu.de/fileadmin/Da-ten\\_BMU/Download\\_PDF/Glaeserne\\_Gesetze/19.\\_Lp/ta\\_luft/entwurf/ta\\_luft\\_180716\\_begrueundung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Da-ten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/ta_luft/entwurf/ta_luft_180716_begrueundung_bf.pdf) [Abruf: 04.08.2019].
- [54] Kalusch O. Stellungnahme zum Entwurf der Novellierung der TA Luft; 2018. Online unter URL: [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/bund/bund\\_novellierung\\_ta\\_luft\\_stellungnahme.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/bund_novellierung_ta_luft_stellungnahme.pdf) [Abruf: 04.08.2019].
- [55] Brandt M, Einhenkel-Arle D. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe: Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar?; 2016. Online unter URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische\\_aromatische\\_kohlenwasserstoffe.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische_aromatische_kohlenwasserstoffe.pdf) [Abruf: 13.12.2019].
- [56] Giern S, Ochs A. Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft): Stellungnahme des BDE zum Entwurf zur Anpassung der TA Luf (neuer Referentenentwurf vom 16.07.2018); 2018. Online unter URL: <https://www.bde.de/assets/public/Dokumente/Biomasse/180810-BDE-Stn-TA-Luft-Referentenentwurf-Stand-16-07-2018.pdf> [Abruf: 07.12.2019].
- [57] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). Stellungnahme zum Entwurf zur Änderung der TA Luft vom 16.07.2018; 2019. Online unter URL: [https://www.vdma.org/documents/105843/27027671/BDI-Stellungnahme%20zum%20TA%20Luft-Entwurf%20vom%2016%2007%202018\\_1541413763021.pdf/97905aaa-7dca-6122-bcd5-7bc0e26a91ab](https://www.vdma.org/documents/105843/27027671/BDI-Stellungnahme%20zum%20TA%20Luft-Entwurf%20vom%2016%2007%202018_1541413763021.pdf/97905aaa-7dca-6122-bcd5-7bc0e26a91ab) [Abruf: 07.12.2019].
- [58] Meyer B. BDSV: TA Luft schießt über das Ziel hinaus: BDSV Pressemitteilung; 2018. Online unter URL: [http://bdsv.de/de/resources/2018\\_31\\_08\\_PM\\_Stellungnahme\\_TALuft.pdf](http://bdsv.de/de/resources/2018_31_08_PM_Stellungnahme_TALuft.pdf) [Abruf: 29.09.2019].
- [59] Girmscheid G. Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse. Heidelberg: Springer; 2010.
- [60] Newell S. Improving Shredder Performance: Now and In the Future; 2016. Online unter URL: [http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=2ahU-KEWjl87LU5vXkAhWBUIAKHd4CB4kQFjAlegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fnewellequip.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FImprove-Shredder-Performance-3-Oct15.ppt&usg=AOvVaw2p\\_DstggpNy5iZQE5Nrx-7](http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=2ahU-KEWjl87LU5vXkAhWBUIAKHd4CB4kQFjAlegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fnewellequip.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F02%2FImprove-Shredder-Performance-3-Oct15.ppt&usg=AOvVaw2p_DstggpNy5iZQE5Nrx-7) [Abruf: 29.09.2019].



- [61] Orglmeister A. Brandrisiken in Abfallaufbereitungsanlagen minimieren – Brandfrüherkennung und automatisches Löschen. In: Thiel S, Thomé-Kozmiensky E, Goldmann D, Hrsg. Recycling und Rohstoffe. Nietwerder: TKh2018; 2018. 616–24.
- [62] Hohberger S, Damlachi H. Performancesteigerung im Unternehmen: Innovative Tools und Techniken. Wiesbaden: Springer Gabler; 2017.
- [63] Holländer J. Berechnung und Analyse von Hammerbrechern: Dissertation; 2001. Online unter URL: <https://d-nb.info/962863939/34> [Abruf: 12.12.2019].
- [64] Bittner H-J. Kontinuierliche berührungslose Wägung mit radiometrischer Bandwaage. Online unter URL: [http://www.rgi-ms.de/html/bw\\_deutsch.htm](http://www.rgi-ms.de/html/bw_deutsch.htm) [Abruf: 19.10.2019].
- [65] Bonath R. Radiometrische Prozessmesstechnik mit optimierter Sicherheit. etz elektrotechnik & automation, (S1); 2010. 2–7. Online unter URL: [https://www.etz.de/files/e0s127zfe\\_bonath\\_vega.pdf](https://www.etz.de/files/e0s127zfe_bonath_vega.pdf) [Abruf: 19.10.2019].
- [66] Schubert H, Hrsg. Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. 1., Auflage. Weinheim: Wiley-VCH; 2012.
- [67] ZenRobotics Ltd. ZenRobotics Heavy Picker: Produktdaten 2018; 2019. Online unter URL: [https://zenrobotics.com/wp-content/uploads/2019/05/zenrobotics\\_fact\\_sheet\\_heavy\\_picker\\_2019.pdf](https://zenrobotics.com/wp-content/uploads/2019/05/zenrobotics_fact_sheet_heavy_picker_2019.pdf) [Abruf: 27.10.2019].
- [68] EU-Recycling + Umwelttechnik. Abfallsortierung der Zukunft: durch Mensch oder Roboter? EU-Recycling + Umwelttechnik, 10; 2018. 10. Online unter URL: <https://eu-recycling.com/Archive/21175> [Abruf: 20.10.2019].
- [69] Hirsch-Kreinsen H, Ittermann P, Niehaus J. Digitalisierung industrieller Arbeit: Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft; 2018.
- [70] Bracht U, Geckler D, Wenzel S. Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Berlin: Springer Vieweg; 2018.
- [71] Behnke A. Die Fortschreibung der TA Luft. In: Thomé-Kozmiensky KJ, Löschau M, Hrsg. Immissionsschutz: Recht - Umsetzung - Messung - Emissionsminderung. Nietwerder: TK-Verlag; 2015. 15–21.
- [72] Rouilloux G, Klink G, Wadivkar O, Znojek B. Plastics. The Future for Automakers and Chemical Companies; 2012. Online unter URL: [https://www.at-kearney.de/documents/20152/435212/Plastics-The\\_Future\\_for\\_Automakers\\_and\\_Chemical\\_Companies.pdf/0b57d43f-2fea-5074-4abd-026e016f61c4](https://www.at-kearney.de/documents/20152/435212/Plastics-The_Future_for_Automakers_and_Chemical_Companies.pdf/0b57d43f-2fea-5074-4abd-026e016f61c4) [Abruf: 29.11.2019].

- [73] Trechow P. Leichtbau wird Materialmix von Autos massiv verändern; 2012. Online unter URL: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/leichtbau-materialmix-autos-massiv-veraendern/> [Abruf: 29.11.2019].
- [74] Umweltbundesamt. Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2017; 2019. Online unter URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht\\_altfahrzeug\\_2017\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_altfahrzeug_2017_bf.pdf) [Abruf: 18.12.2019].
- [75] Gelowicz S. Leichtbau: Über den Multimaterialmix im neuen Porsche 911; 2019. Online unter URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-ueber-den-multi-materialmix-im-neuen-porsche-911-a-820038/> [Abruf: 29.11.2019].
- [76] Schweitzer H. Hybrider Materialmix für die Karosserie der Zukunft; 2019. Online unter URL: <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/hybrider-materialmix-fuer-die-karosserie-der-zukunft-a-809060/> [Abruf: 30.11.2019].
- [77] ThyssenKrupp Steel Europe AG. Leichtbau mit Stahl: LITECOR von ThyssenKrupp Steel Europe geht ins Rennen; 2014. Online unter URL: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung-6552.html> [Abruf: 30.11.2019].
- [78] Patberg L, Ferkel H, Heller T, Hoffmann O, Mendelin C. Nachhaltiger Leichtbau durch Stahlfeinblech im Automobil: Werkstoffwoche 2015: "Werkstoffe für die Zukunft"; 2015. Online unter URL: [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/Nachhaltiger\\_Leichtbau\\_Patberg\\_Werkstoffwoche\\_15.09.15\\_Druckversion.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/Nachhaltiger_Leichtbau_Patberg_Werkstoffwoche_15.09.15_Druckversion.pdf) [Abruf: 30.11.2019].
- [79] Kirchbeck B. Leichtbau verliert im E-Auto an Bedeutung; 2018. Online unter URL: <https://www.next-mobility.news/leichtbau-verliert-im-e-auto-an-bedeutung-a-685412/> [Abruf: 30.11.2019].
- [80] Stauber R. Kunststoff – Der Allrounder im Automobilbau; 2017. Online unter URL: <https://www.chemanager-online.com/printpdf/39527> [Abruf: 30.11.2019].
- [81] Buchert M, Degreif S, Dolega P. Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität: Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen; 2017. Online unter URL: [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige\\_Rohstoffversorgung\\_Elektromobilitaet/Agora\\_Verkehrswende\\_Synthesepapier\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf) [Abruf: 01.12.2019].

- [82] Siebenhaar H-P. Ausgebrannter Tesla in Österreich wird zum hochgefährlichen Sondermüll; 2019. Online unter URL: <https://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/elektroauto-ausgebrannter-tesla-in-oesterreich-wird-zum-hochgefaehrlichen-sondermuell/25232168.html> [Abruf: 30.11.2019].
- [83] Taylor B. BIR 2019: Lithium-ion batteries spark a burning issue for recyclers; 2019. Online unter URL: <https://www.recyclingtoday.com/article/bir-2019-recycling-fires-lithium-ion-batteries/> [Abruf: 01.12.2019].
- [84] Bruns S, Dinse M. Brandschutz im Umgang mit gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien im Recyclingbetrieb. In: Thiel S, Thomé-Kozmiensky E, Goldmann D, Hrsg. Recycling und Rohstoffe. Nietwerder: TKh2018; 2018. 605–13.
- [85] PlasticsEurope AISBL. Plastics – the Facts 2018: An analysis of European plastics production, demand and waste data; 2018. Online unter URL: [https://www.plasticseurope.org/download\\_file/force/2367/319](https://www.plasticseurope.org/download_file/force/2367/319) [Abruf: 30.11.2019].
- [86] PlasticsEurope AISBL. Plastics – the Facts 2012: An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011; 2012. Online unter URL: [https://www.plasticseurope.org/download\\_file/force/1144/319](https://www.plasticseurope.org/download_file/force/1144/319) [Abruf: 01.12.2019].
- [87] Eng T. Könnte die National Sword-Initiative in China die Innovation der globalen Recyclingwirtschaft vorantreiben?; 2018. Online unter URL: <https://www.tomra.com/de/sorting/recycling/recycling-news/2018/could-the-chinese-national-sword-inspire-global> [Abruf: 03.12.2019].
- [88] Stagge M. Wasserstoff statt Kohle. thyssenkrupp Steel startet wegweisendes Projekt für eine klimafreundliche Stahlproduktion am Standort Duisburg; 2019. Online unter URL: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung-110080.html> [Abruf: 02.12.2019].
- [89] Langner A. Weltneuheit für Stahl: ArcelorMittal untersucht industriellen Einsatz von reinem Wasserstoff; 2019. Online unter URL: <https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/broker.jsp?uMen=89b7978c-4ffe-7610-3928-d05b8e0b2b66&uCon=71a40c6c-f454-b961-d4e1-e3050736c0f2&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042> [Abruf: 02.12.2019].
- [90] Stahl-Zentrum. Engagement für Stahl: Jahresbericht 2017; 2017. Online unter URL: <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjt1OCg75jmAhUMLFAKHWKVALIQF->

jACegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.stahl-online.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F12%2FWV-Stahl\_Jahresbericht\_2017-D-RZ\_Web.pdf&usg=AOvVaw12XQSU8OcywvMeXyeggAj- [Abruf: 03.12.2019].

- [91] Hölling M, Weng M, Gellert S. Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff: Evaluation of Hydrogen-Based Production of DRI. Stahl und Eisen, 2017(6). 47–56. Online unter URL: <https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/b8e/b8e0c15a-102c-d51d-b2a9-147d7b2f25d3,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf> [Abruf: 03.12.2019].
- [92] Hiebel M, Nühlen J. Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott: Zukunft Stahlschrott; 2016. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Studie\\_Fraunhofer\\_Umsicht.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Studie_Fraunhofer_Umsicht.pdf) [Abruf: 03.12.2019].
- [93] Pothen F, Growitsch C, Engelhardt J, Reif C. Schrottbonus: Externe Kosten und fairer Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung; 2019. Online unter URL: [https://www.bdsv.org/fileadmin/user\\_upload/Studie\\_Schrottbonus\\_gesamt\\_final.pdf](https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/Studie_Schrottbonus_gesamt_final.pdf) [Abruf: 03.12.2019].
- [94] Daehn KE, Serrenho AC, Allwood JM. How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling?; 2017. Online unter URL: [https://pubs.acs.org/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=LA4\\_dzj2GXqlgWsm\\_lahejhXjrdJkWjJkozLI8X-p2M,&dl](https://pubs.acs.org/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=LA4_dzj2GXqlgWsm_lahejhXjrdJkWjJkozLI8X-p2M,&dl) [Abruf: 03.12.2019].
- [95] van Damme J. Dismantling versus Post Shredder Separation – A cost analysis; 2019. Online unter URL: <https://atfpro.co.uk/dismantling-versus-post-shredder-separation-a-cost-analysis/> [Abruf: 18.12.2019].

## Anhang

### Anhang A: BREF Bewertungsmatrix für Schredderanlagen

Kapitel 1	Allgemeine Informationen	Seite	Relevanz
Kap. 1.2.13	PCB versetzter Abfall	14	Yellow
Kap. 1.3.1	Kurzbeschreibung Schredderanlagen	17	Green
Kap. 1.3.11	Installationen für die Reaktivierung von Aktivkohle	23	Yellow
Kap. 1.3.13	Installationen für die Behandlung von heizwertreichen Abfällen	24	Red
Kap. 1.5	Allgemeine Umweltauswirkungen durch Abfallbehandlungsanlagen	29	Green

Kapitel 2	Allgemein angewandte Prozesse und Techniken bei der Abfallbehandlung	Seite	Relevanz
Kap. 2.1.1	Befundung/Bewertung und Annahme von Abfällen	32	Yellow
Kap. 2.1.2	Lagerung	33	Yellow
Kap. 2.1.3	Material-/Abfalltransport	35	Yellow
Kap. 2.1.4	Vermischen und Vermengen	37	Yellow
Kap. 2.1.6	Reinigen und Waschen	40	Yellow
Kap. 2.1.7	Zerkleinerung von Feststoffabfall	41	Red
Kap. 2.1.8	Ungewöhnliche Betriebszustände	42	Yellow
Kap. 2.2.2	Allgemeine Informationen zu Emissionsleveln	46	Green
Kap. 2.2.2.1	Staubemissionen in die Luft	47	Green
Kap. 2.2.2.2	Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen in die Luft	50	Green
Kap. 2.3.1	Organisatorische Maßnahmen zur Verbesserung der Umwelteinwirkungen	62	Yellow
Kap. 2.3.1.1	Umweltmanagementsystem (UMS)	62	Yellow
Kap. 2.3.1.2	Emissionsquellenverzeichnis	64	Yellow
Kap. 2.3.2	Operative Maßnahmen zur Verbesserung der Umwelteinwirkungen	67	Yellow
Kap. 2.3.2.1	Abfall Befundung/Bewertung	67	Yellow
Kap. 2.3.2.2	Bestimmung der Abfallzusammensetzung	70	Yellow
Kap. 2.3.2.3	Annahme von Abfällen	73	Yellow
Kap. 2.3.2.4	Abfallbeprobung	76	Red
Kap. 2.3.2.5	Abfallverfolgungssysteme und Abfallregisters	79	Red
Kap. 2.3.2.6	Output-Qualitätsmanagementsystem für die Abfallbehandlung	80	Red
Kap. 2.3.2.7	Abfalltrennung	82	Yellow
Kap. 2.3.2.8	Vereinbarkeitsprüfung von Abfallstoffen	86	Red
Kap. 2.3.2.9	Abfallsortierung	88	Yellow
Kap. 2.3.3	Überwachung	102	Green
Kap. 2.3.3.3	Überwachung von Emissionen in Gewässer	104	Yellow
Kap. 2.3.3.4	Überwachung gefasster Emissionen in die Luft	105	Green
Kap. 2.3.4	Technische Maßnahmen zur Verminderung und Kontrolle von konzentrierten Emissionen	108 ff.	Green
Kap. 2.3.5.3	Verminderung diffuser Emissionen	121	Green
Kap. 2.3.5.5	Abfackeln	126	Red
Kap. 2.3.6.1	Abwasserbehandlung von Abfallbehandlungsanlagen	129	Red

Kap. 2.3.6.2	Beschreibung der individuellen Abwasserbehandlungsmaßnahmen	190 ff.	
Kap. 2.3.7	Technische Maßnahmen zur Optimierung des Wasserverbrauchs und der Abwassererzeugung	211	
Kap. 2.3.8	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Rohstoffen und Chemikalien	213	
Kap. 2.3.9	Energieeffizienzmaßnahmen	215	
Kap. 2.3.10	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Kontrolle von Lärmemissionen und Erschütterungen	218	
Kap. 2.3.11	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Boden- und Wasserkontamination	220	
Kap. 2.3.12	Materialeffizienz durch die Nutzung von Abfällen als Ersatzstoff	222	
Kap. 2.3.13	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung umwelttechnischer Auswirkungen durch Unfälle und Ereignisse	224	
Kap. 2.3.14	Technische Maßnahmen zur Betriebsstilllegung	233	

<b>Kapitel 3</b>	<b>Mechanische Abfallbehandlung</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Kap. 3.1.	Mechanische Behandlung in Schrott- und Metallschredderanlagen	235	
Kap. 3.1.2	Aktuelle Emissions- und Verbrauchsgrößen	245	
Kap. 3.1.2.1	Luftemissionen	245	
Kap. 3.1.2.1.2	Staub und partikelgebundene Metalle	246	
Kap. 3.1.2.1.3	Flüchtige organische Verbindungen	251	
Kap. 3.1.2.1.4	PCB und Dioxine	253	
Kap. 3.1.2.1.5	Blei	256	
Kap. 3.1.2.2	Wasseremissionen und Wasserverbrauch	259	
Kap. 3.1.2.3	Lärm und Vibrationen	264	
Kap. 3.1.2.4	Energieverbrauch	265	
Kap. 3.1.3.1	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Luftemissionen	265 ff.	
Kap. 3.1.3.2	Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Kontrolle von Lärmemissionen und Erschütterungen	281	
Kap. 3.1.3.3	Technische Maßnahmen zur Verminderung des Energiebedarfs	285	
Kap. 3.1.3.4	Wassermanagement bei der mechanischen Behandlung in Schrott- und Metallschredderanlagen	258	

<b>Kapitel 6</b>	<b>BVT-Schlussfolgerungen für die Abfallbehandlung</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Kap. 6.1	Allgemeine BVT-Schlussfolgerungen	718	
Kap. 6.1.1	Allgemeine Umweltleistungen	718	
BVT 1	Einführung und Anwendung eines Umweltmanagementsystems	718	
BVT 2	Verbesserung der allgemeinen Umweltleistung der Anlage	719	
BVT 3	Aufstellen und Führen einer Liste der Abwasser- und Abgasströme und ihrer Merkmale	720	
BVT 4	Verringerung des mit der Abfalllagerung assoziierten Umweltrisikos	721	

BVT 5	Verringerung des mit dem Handling und dem Umschlag/Transport von Abfall assoziierten Umweltrisikos	722	
Kap. 6.1.2	Überwachung	722	
BVT 6	Überwachung der wichtigsten Prozessparameter für relevante Emissionen in Gewässer	722	
BVT 7	Überwachung von Emissionen in Gewässer unter Anwendung der EN-Normen	722	
BVT 8	Überwachung gefasster Emissionen in die Luft nach EN-Normen	726	
BVT 11	Überwachung des jährlichen Wasser-, Energie- und Rohstoffverbrauchs	728	
Kap. 6.1.3	Emissionen in die Luft	728	
BVT 14	Technische Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung diffuser Emissionen in die Luft	730	
BVT 15	Abfackeln	731	
Kap. 6.1.4	Lärm und Erschütterungen	732	
BVT 17	Einführung und Umsetzung eines Managementplans zur Vermeidung oder Minderung von Lärmemissionen und Erschütterungen	732	
BVT 18	Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von Lärmemissionen und Erschütterungen	733	
Kap. 6.1.5	Emissionen in Gewässer	734	
BVT 19	Maßnahmen zur Optimierung des Wasserverbrauchs, zur Reduzierung der anfallenden Abwassermengen und zur Vermeidung oder zur Minderung der Emissionen in Böden und Gewässer	734	
BVT 20	Maßnahmen zur Behandlung der Abwässer	736	
	BVT-assoziierte Emissionswerte für Direkteinleitungen in Gewässer	737	
	BVT-assoziierte Emissionswerte für indirekte Einleitungen in einen Vorfluter	738	
Kap. 6.1.6	Emissionen durch Unfälle und Ereignisse	740	
BVT 21	Maßnahmen zur Verhinderung oder Begrenzung der Umweltfolgen von Unfällen und Ereignissen	740	
Kap. 6.1.7	Materialeffizienz	740	
BVT 22	Effizienten Materialnutzung durch den Ersatz von Materialien durch Abfall	740	
Kap. 6.1.8	Energieeffizienz	741	
BVT 23	Maßnahmen zu effizienten Energienutzung	741	
Kap. 6.1.9	Wiederverwendung von Verpackungen	741	
BVT 24	Maximale Wiederverwendung von Verpackungen	741	
Kap. 6.2	Allgemeine BVT-Schlussfolgerungen für die mechanische Abfallbehandlung	742	
Kap. 6.2.1.1	Emissionen in die Luft	742	
BVT 25	Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen von Staub, partikelgebundenen Metallen, PCDD/F und dioxinähnlichen PCB in die Luft	742	
	BVT-assoziiertes Emissionswert für gefasste Staubemissionen in die Luft durch mechanische Abfallbehandlung	742	
Kap. 6.2.2	BVT-Schlussfolgerungen für die mechanische Behandlung von metallischen Abfällen im Schredder	743	
Kap. 6.2.2.1	Allgemeine Umweltleistung	743	
BVT 26	Maßnahmen zur Verbesserung der allgemeinen Umweltleistung und zur Vermeidung von Emissionen durch Unfälle und Ereignisse	743	
Kap. 6.2.2.2	Verpuffungen		

BVT 27	Maßnahmen zur Vermeidung von Verpuffungen und zur Minderung von Emissionen bei auftretenden Verpuffungen	743	
Kap. 6.2.2.3	Energieeffizienz	744	
BVT 28	Stabilen Beschickung des Schredders zur effizienten Energienutzung	744	

<b>Kapitel 7</b>	<b>Techniken in der Entwicklung</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Kap. 7.2	Mechanische Behandlung	769	
Kap. 7.2.1	Mechanische Behandlung in Schrott- und Metallschredderanlagen	769	
Kap. 7.2.1.1	Auflösung von VOCs	769	
Kap. 7.2.1.2	Minderung von VOCs im Abgasstrom des Schredders durch Ionisation in Verbindung mit Aktivkohleadsorption	770	

## Anhang B: TA Luft-Entwurf Bewertungsmatrix für Schredderanlagen

<b>Nummer 2</b>	<b>Begriffsbestimmungen und Einheiten im Messwesen</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Nr. 2.1	Immissionen	12	
Nr. 2.2	Immissionskenngrößen, Beurteilungspunkte, Aufpunkte	12	
Nr. 2.3	Immissionswerte	13	
Nr. 2.4	Abgasvolumen und Abgasvolumenstrom	13	
Nr. 2.5	Emissionen	14	
Nr. 2.6	Emissionsgrad und Emissionsminderungsgrad	15	
Nr. 2.7	Emissionswerte und Emissionsbegrenzungen	15	
Nr. 2.10	Altanlagen	17	

<b>Nummer 3</b>	<b>Rechtliche Grundsätze für Genehmigung, Vorbescheid und Zulassung des vorzeitigen Beginns</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Nr. 3.1	Prüfung der Anträge auf Erteilung einer Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb neuer Anlagen	19	
Nr. 3.4	Prüfung der Genehmigungsbedürftigkeit einer Änderung (§§ 15 Absätze 2 und 2a BImSchG)	20	
Nr. 3.5	Prüfung der Anträge auf Erteilung einer Änderungsgenehmigung	21	
Nr. 3.6	Prüfung der Betriebsorganisation	23	

<b>Nummer 4</b>	<b>Anforderungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Nr. 4.2.1	Immissionswerte	26	
Nr. 4.2.2	Genehmigung bei Überschreiten der Immissionswerte	28	
Nr. 4.2.3	Genehmigung bei künftiger Einhaltung der Immissionswerte	29	
Nr. 4.3.1.1	Immissionswert für Staubniederschlag	30	
Nr. 4.3.1.2	Genehmigung bei Überschreiten des Immissionswertes	30	
Nr. 4.5.1	Immissionswerte für Schadstoffdepositionen	35	



Nr. 4.5.2	Genehmigung bei Überschreitung der Immissionswerte für Schadstoffdepositionen oder der Prüf- und Maßnahmenwerte	36	
Nr. 4.6.1.1	Ermittlung im Genehmigungsverfahren	37	
Nr. 4.6.2	Ermittlung der Vorbelastung	40	
Nr. 4.6.3	Kenngößen für die Vorbelastung	46	
Nr. 4.7	Einhaltung der Immissionswerte	48	
Nr. 4.8	Prüfung, soweit Immissionswerte nicht festgelegt sind, und in Sonderfällen	49	

<b>Nummer 5</b>	<b>Anforderungen zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen</b>	<b>Seite</b>	<b>Relevanz</b>
Nr. 5.1.1	Vorgaben zur Umsetzung der BVT-Schlussfolgerungen	54	
Nr. 5.1.2	Berücksichtigung der Anforderungen im Genehmigungsverfahren	56	
Nr. 5.1.3	Grundsätzliche Anforderungen zur integrierten Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen	59	
Nr. 5.2.1	Gesamtstaub	61	
Nr. 5.2.2	Staubförmige anorganische Stoffe	61	
Nr. 5.2.3	Staubförmige Emissionen bei Umschlag, Lagerung oder Bearbeitung von festen Stoffen	64	
Nr. 5.2.3.1	Allgemeines	64	
Nr. 5.2.3.2	Be- oder Entladen	65	
Nr. 5.2.3.3	Förderung oder Transport	67	
Nr. 5.2.3.4	Bearbeitung oder Aufbereitung	68	
Nr. 5.2.3.5	Lagerung	68	
Nr. 5.2.3.6	Besondere Inhaltsstoffe	69	
Nr. 5.2.5	Organische Stoffe	71	
Nr. 5.2.7	Karzinogene, keimzellmutagene oder reproduktionstoxische Stoffe	83	
Nr. 5.2.9	Bioaerosole	90	
Nr. 5.2.11	Energie und Einsatzstoffe	91	
Nr. 5.2.11.1	Allgemeines	92	
Nr. 5.2.11.2	Maßnahmen zur Energieeinsparung, einschließlich elektrischer Energie, und zur effizienten Energienutzung	92	
Nr. 5.2.11.3	Maßnahmen zur Einsparung von Einsatzstoffen und Umgang mit Rückständen	93	
Nr. 5.3.2	Einzelmessungen	94	
Nr. 5.3.3	Kontinuierliche Messungen	98	
Nr. 5.3.5	Gleichwertigkeit zu VDI-Richtlinien	105	
Nr. 5.4.8.9.1	Anlagen zur Behandlung von nicht gefährlichen metallischen Abfällen in Schredderanlagen	359	
Nr. 5.4.8.12	Anlagen zur zeitweiligen Lagerung von Eisen- oder Nichteisenschrotten, einschließlich Autowracks	378	

## Anhang C: Detailaufschlüsselung der Sortenbereinigung

29 Sortenbezeichnungen (Ursprungsauswertung)	12 Sortenbezeichnungen	4 Sortenklassen
4er Material	SVM	Mischschrott
84er Material	Mischschrott	Karosserien
85er Material	Mischschrott inkl. Karosserien	Blechabfälle
851er Material	Karosserien inkl. Motor	Komplexschrotte
Schrottpakete, gepresste Karosserien	Karosserien exkl. Motor	-
Karosserien, Blechschrott	Karosserienpakete	-
Holz-Metall	Weißer Ware	-
MV-Schrott	Blechabfälle	-
Karosserieschrott, Mischschrott, weißer Ware	Aluminiumschrott	-
DSD-Material	Doppelschredder	-
Waschmaschinenschrott	MV-Schrott	-
Karosserieschrott	DSD-Schrott	-
Mischschrott	-	-
Karosserieschrott exkl. Motor	-	-
Karosserieschrott inkl. Motor	-	-
Schrott	-	-
Aluminiumschrott	-	-
insbesondere Kraftfahrzeuge	-	-
Mischschrott (überwiegend aus Autowracks, Verpackungen, Bleche)	-	-
84er, 85er, eisenhaltiges Holz	-	-
N + H	-	-
Karosserien/Misch-/Sammelschrott	-	-
Mischschrott (82%Mischschrott, 15% Autowracks, 3% weißer Ware)	-	-
Karosserien-/Misch-/Sammelschrott	-	-
Autowracks/Eisenmüll	-	-
SVM inkl. Karosserien	-	-
SVM	-	-
Weißer Ware	-	-
unterschiedliche Fraktionen	-	-

## Anhang D: SLF aus SVM

## Versuchsauswertung: Dezentrale SLF

