

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Reinheitsgerechte Materialflusssysteme

der Forschungsstelle(n)

TU Dortmund, Institut für Produktionssysteme, Professur für Arbeits- und Produktionssysteme

Das IGF-Vorhaben 17495 N/1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dortmund, 30.07.14

Ort, Datum

Dipl.-Wirt-Ing. Ronny Zwinkau

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

IGF-Forschungsvorhaben 17495 N/1

Forschungsthema

Reinheitsgerechte Materialflusssysteme (ReiMaFlu)

Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme
Professur für Arbeits- und Produktionssysteme
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Projektleiter

Dipl.-Wirt.-Ing. Ronny Zwinkau

Projektbearbeiter

Dipl.-Wirt.-Ing. Ronny Zwinkau
Dipl.-Ing. Matthias Krebs

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17495 N/1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V. ist im Zeitraum vom 01.04.2012 bis zum 31.03.2014 über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

www.ips.do

Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Buchbeiträge/Dissertationen/Internet

Der Sachbericht zum IGF-Forschungsvorhaben wird mit entsprechendem Förderhinweis über das Eldorado-System der Technischen Universität Dortmund interessierten Unternehmen online zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse des IGF-Forschungsvorhabens Reinheitsgerechte Materialflusssysteme sind langfristig verfügbar. Entsprechende Verweise zum Sachbericht des IGF-Forschungsvorhabens werden zum einen auf der Homepage der Forschungsvereinigung und zum anderen auf der Homepage der Forschungsstelle eingerichtet.

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V.

<http://www.gvb-ev.de>

Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme

<http://www.ips.do>

Vorträge

Inhalte und Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden interessierten Vertretern der Industrie am 27.02.2013 unter dem Titel „Reinheitsgerechte Gestaltung des Wertstroms – Reinheit erhalten - Verschwendung vermeiden Teil 1“ und am 27.03.2014 im Rahmen der Veranstaltung „Reinheitsgerechte Gestaltung des Wertstroms – Reinheit erhalten - Verschwendung vermeiden Teil 2“ an der Technische Universität Dortmund vorgestellt.

Zwinkau, R.; Krebs, M: *ReiMaFlu– Reinheitsgerechte Materialflusssysteme*. Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben. Dortmund, 27.02.2013.

Krebs, M.; Zwinkau, R.: *Systemische Untersuchung von Einflussfaktoren der Technischen Sauberkeit (TecSa) auf den Wertstrom*. Vortrag auf dem zweiten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben. Dortmund, 27.03.2014.

Krebs, M.; Zwinkau, R.: Sauberkeitsplanung als Erfolgsfaktor bei der Auslegung von Wertströmen. In: 5. Fachtagung Technische Sauberkeit in Montage- und Produktionsprozessen. Stuttgart, Germany, 19.-20.05.2014

Posterausstellungen

Posterausstellung im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschusses „Data Mining – Potentiale und Anwendungsfelder entlang des Produktlebenszyklus“

Posterausstellung auf der Fachmesse „Parts2Clean“ in der Messe Stuttgart, 22. - 24. Oktober 2013

Beiträge in Zeitschriften

- Krebs, M.; Zwinkau, R.: Medien und Energie bei der Teilereinigung effizient einsetzen, in: Nachhaltige Produktion, Interview, Jahrgang 3, Ausgabe 1, April 2013
- Zwinkau, R.; Krebs, M: Leitfaden zur reinheitsgerechten Gestaltung von Materialflüssen entlang des Wertstroms, Interview durch das Onlinemagazin Sauberkeit und Reinraum; 22.05.2014
URL: <http://www.sauberkeit-und-reinraum.com/leitfaden-zur-reinheitsgerechten-gestaltung-von-materialfluessen-entlang-des-wertstroms/>

Erarbeitete Inhalte im IGF Forschungsvorhaben 17495N/1

Die Reinheitsanforderungen an industriell gefertigte Bauteile haben in den letzten Jahren insbesondere in der Automobilindustrie, aber auch in weiteren Branchen wie der Elektroindustrie oder dem Maschinenbau, stark zugenommen. Durch die Entwicklung immer kleinerer und filigraner Bauteile mit hochwertigen Oberflächen steigt die Notwendigkeit, selbst kleinste Verunreinigungen prozesssicher von der Bauteiloberfläche zu entfernen und diesen Zustand entlang des Wertstroms aufrecht zu erhalten. Um insbesondere kleinen und mittelständigen Unternehmen (KMU) die Möglichkeit zu bieten, auf die hieraus resultierenden Herausforderungen bei der Planung und Gestaltung ihrer Wertströme angemessen reagieren zu können, ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Leitfaden zur Überprüfung und Planung der innerbetrieblichen Materialflussoperationen im Hinblick auf die Bauteilsauberkeit entwickelt worden.

Schwerpunkt war die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise bei der Modellierung der Wertströme, die Klassifizierung repräsentativer technischer Mittel des Materialflusses sowie die Identifikation und Bewertung der hierbei auftretenden sauberkeitsrelevanten Einflüsse.

Auf Basis einer umfassenden Recherche und Gesprächen mit Experten aus der Industrie konnten Herausforderungen und Anforderungen an die technischen Mittel des Materialflusses zur Erhaltung der Bauteilsauberkeit bei Materialflussoperationen systematisch aufgenommen und klassifiziert werden. Die Vielfältigkeit von Materialflussoperationen sowie die zahlreichen technischen Mittel, die für diese eingesetzt werden können, führen zu einer hohen Anzahl möglicher Lösungen. Darüber hinaus wurden Möglichkeiten der Rückverschmutzung von gereinigten Bauteilen entlang des Wertstroms ermittelt und systematisiert. Diese Analyse verdeutlicht die Komplexität der untersuchten Thematik und die Vielzahl an unternehmensspezifischen Anforderungen und Einflüssen auf die Sauberkeit von Bauteilen.

Die identifizierten Einflussgrößen aus den Bereichen Produkt, Prozesse und Ressourcen sind in einen unternehmensneutralen Leitfaden zur systematischen Planung und Gestaltung von sauberkeitsgerechten Materialflussoperationen eingeflossen. Insbesondere KMU werden durch den entwickelten Leitfaden befähigt, ihre Prozesse mit den dortigen spezifischen Sauberkeitsanforderungen eigenständig und systematisch zu gestalten. Aspekte von der Festlegung der Sauberkeitsgrenzwerte, über die Identifikation sauberkeitsrelevanter Einflussgröße bis zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen sind in dem Leitfaden adressiert. Somit ist es möglich, Materialflussoperationen und die dort eingesetzten technischen Mittel sauberkeitsgerecht spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall zu gestalten.

Das Ziel des Vorhabens wurde durch die zuvor aufgezeigten Ergebnisse erreicht.

Gegenüberstellung der Zielsetzungen und der erzielten Ergebnisse

Die generelle Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht in der konzeptionellen Entwicklung einer Methodik sowie in dem Aufbau eines webbasierten Leitfadens, der die Anwender bei der sauberkeitsgerechten Gestaltung ihrer Materialflussoperationen unterstützt und gleichzeitig ermöglicht, bestehende Materialflüsse zu überprüfen. Dies soll erreicht werden, indem

1. Verschmutzungsmöglichkeiten bei Materialflussoperationen analysiert, kategorisiert und bewertet werden
2. Repräsentative technische Mittel des Materialflusses und Verpackungskonzepte in Bezug auf Bauteilsauberkeit untersucht und klassifiziert werden
3. Ein Bausteinsystem zur Gestaltung eines reinheitsgerechten Wertstroms entwickelt und softwaretechnisch umgesetzt wird.

zu 1. Mit dem im Forschungsvorhaben entwickelten Leitfaden und den hierfür systematisch aufbereiteten Einflussgrößen ist es Unternehmen möglich, individuelle Verschmutzungsmöglichkeiten bei ihren vielzähligen Materialflussoperationen zu identifizieren. Es wird möglich, diese Verschmutzungsmöglichkeiten auf ihr Risiko für die Funktion der Bauteile sowie für die Durchführbarkeit nachfolgender Prozesse zu bewerten und bei Bedarf auf dieser Basis geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

zu 2. Im Rahmen der Untersuchung von Materialflussoperationen wurden die hierfür eingesetzten repräsentativen technischen Mittel in eine Morphologie überführt. Mit Hilfe dieser Morphologie wird es Unternehmen ermöglicht, die eingesetzten technischen Mittel bei ihren individuellen Materialflussoperationen standardisiert zu beschreiben. Darüber hinaus wird eine Vergleichbarkeit der Beschreibung über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglicht.

zu 3. Durch die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise bei der Planung und Gestaltung sauberkeitsgerechter Materialflussoperationen in Form eines allgemeingültigen Leitfadens, wurde für die Unternehmen eine Möglichkeit geschaffen, ihre Materialflussoperationen individuell abzubilden und zu bewerten. Durch die unterschiedlichsten Sauberkeitsanforderungen sowie die vielfältigen Einflussgrößen auf die Bauteilsauberkeit bei Materialflussoperationen, hervorgerufen durch Produkt-, Prozess- und Ressourceneigenschaften, sowie deren Wechselwirkungen untereinander spiegelt das mit dem Leitfaden erzielbare Planungsergebnis die Realität in einem Unternehmen sehr gut wieder. Im Gegensatz dazu bietet ein Bausteinsystem grundsätzlich die Möglichkeit zur schnellen und intuitiven Modellierung von sauberkeitsgerechten Materialflüssen. Es besitzt jedoch den Nachteil, dass es durch seinen verallgemeinerten und unternehmensneutralen Aufbau sowie der begrenzten Anzahl an Bausteinen diese Realität nicht hinreichend genau erreichen kann. Durch die barrierefreie Zugänglichkeit des Leitfa-

dens im Internet ist dessen Verbreitung für die Industrie und insbesondere für KMU sichergestellt.

Das für die durchgeführten Recherchen und Untersuchungen eingesetzte wissenschaftliche Personal war für die Generierung der dargestellten Ergebnisse erforderlich. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für Unternehmen (insbesondere KMU)

Der im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Leitfaden zur sauberkeitsgerechten Planung und Gestaltung von Materialflussoperationen leistet einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit in Unternehmen und im Besonderen bei KMU. Sowohl Expertengespräche sowie die Diskussionen bei den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses zeigten, dass Unternehmen und dabei insbesondere KMU, vor der Herausforderung stehen, neben ihren Fertigungs- und Montageprozessen auch die Materialflussoperationen sauberkeitsgerecht zu gestalten, da sich die Sauberkeit von Bauteilen in immer mehr Branchen zu einer Leistungsanforderung entwickelt. Dennoch sind zurzeit keine geeigneten und frei zugänglichen Hilfsmittel vorhanden, die im Rahmen des Planungsverlaufs eingesetzt werden können. Eine Anwendung des Leitfadens eröffnet Unternehmen hinsichtlich der anforderungsgerechten Planung und Gestaltung sauberkeitsgerechter Wertströme einen entsprechend wirtschaftlichen Nutzen. Insbesondere kleinen und mittelständigen Unternehmen bietet der entwickelte Leitfaden eine einfache und praxisgerechte Unterstützung bei der Planungsaufgabe. Sie werden in die Lage versetzt, ohne externes Expertenwissen die Sauberkeitsanforderungen ihrer Kunden zu erfüllen und können parallel eine nachhaltige Wissensbasis im Unternehmen aufbauen.

Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Im Forschungsvorhaben wurde ein Leitfaden entwickelt, der die Möglichkeit eröffnet, bestehende Materialflüsse hinsichtlich der Bauteilsauberkeit zu untersuchen und Handlungsempfehlungen für die Um- oder Neugestaltung von reinheitsorientierten Materialflussoperationen abzuleiten. Mit diesem zielorientierten Ansatz wird gewährleistet, einen einmal erreichten Sauberkeitszustand entlang der gesamten Wertschöpfungskette bis zur Ablieferung beim Kunden sicherzustellen. Insbesondere die Überprüfung und Umgestaltung bestehender Materialflüsse trägt dazu bei, diese trotz gesteigerter Reinheitsanforderungen wettbewerbsfähig zu halten und stetig zu verbessern. Da die gesamte Wertschöpfungskette und besonders der Bereich der Logistik zuvor nur unzureichend im Hinblick auf die Technische Sauberkeit erforscht wurden, leisten die Projektergebnisse einen wesentlichen Beitrag zur Wissenserweiterung.

Inhaltsverzeichnis

IGF-Forschungsvorhaben 17495 N/1	I
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehen	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau	5
2 Stand der Technik.....	8
2.1 Das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit.....	8
2.2 Aufbau der Verschmutzungen eines Bauteils.....	8
2.3 Begriffsbestimmung Technische Sauberkeit	9
2.3.1 Partikuläre Verschmutzungen	11
2.3.2 Nicht partikuläre Verschmutzungen.....	11
2.4 Sauberkeitsgrenzwerte	11
2.5 Ausbreitung partikulärer Verschmutzungen.....	15
2.6 Management des Qualitätsmerkmals Technische Sauberkeit	17
2.6.1 Messung und Analyse von partikulären Verschmutzungen	19
2.6.2 Forschungsansätze zur Erzeugung von Technischer Sauberkeit	26
3 Systemische Betrachtung von sauberkeitsgerechten Materialflüssen	28
3.1 Systemtheoretischer Ansatz	28
3.2 Modellierung und Notation.....	30
4 Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit in Materialflussoperationen.....	34
4.1 Produktbezogene Einflussgrößen.....	35
4.1.1 Gestaltungsfeld Geometrie.....	36
4.1.2 Gestaltungsfeld Oberflächenbeschaffenheit.....	37
4.1.3 Gestaltungsfeld Werkstoffeigenschaften	38
4.2 Prozessseitige Einflussgrößen	41
4.2.1 Gestaltungsfeld Fertigungsprozesse	42
4.2.2 Gestaltungsfeld Montageprozesse	43
4.2.3 Gestaltungsfeld Logistikprozesse	44

4.2.4	Gestaltungsfeld Handhaben	45
4.3	Ressourcenbezogene Einflussgrößen	45
4.3.1	Gestaltungsfeld Produktionsumgebung.....	45
4.3.2	Gestaltungsfeld Personal.....	46
4.3.3	Gestaltungsfeld Fertigungseinrichtung	47
4.3.4	Gestaltungsfeld Montageeinrichtung	48
4.3.5	Gestaltungsfeld Reinigungseinrichtung	49
4.3.6	Gestaltungsfeld technische Mittel des Materialflusses	51
4.4	Zusammenfassung der Einflussgrößen	56
5	Leitfaden zur Planung und Gestaltung sauberkeitgerechter Materialflüsse	57
5.1	Anforderungsdefinition an einen Leitfaden zur Modellierung von Materialflüssen und Risikobewertung hinsichtlich Technischer Sauberkeit.....	57
5.2	Untersuchung der Adaptierbarkeit bestehender Methoden des präventiven Qualitätsmanagement auf Technische Sauberkeit.....	58
5.2.1	Quality Function Deployment (QFD)	58
5.2.2	Fehlerbaumanalyse (FTA).....	59
5.2.3	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA).....	60
5.2.4	Design of Experiments (DoE)	65
5.3	Leitfaden zur reinheitsgerechten Gestaltung von Wertströmen	65
6	Untersuchung repräsentativer technischer Mittel des Materialflusses	69
6.1	Identifikation und Bewertung der Einflussgrößen	69
6.1.1	Produktbezogene Einflussgrößen	69
6.1.2	Prozessbezogene Einflussgrößen	69
6.1.3	Ressourcenbezogene Einflussfaktoren	70
6.2	Experimentelle Bestimmung des Zusammenwirkens der Einflussgrößen.....	74
6.2.1	Versuchsplan	74
6.2.2	Beschreibung der Versuchsdurchführung	75
6.2.3	Statistische Auswertung der gesammelten Daten.....	76
7	Zusammenfassung	81
8	Anhang A.....	83
8.1	Leitfragen zu möglichen Rückverschmutzungsmöglichkeiten in Fertigungsprozessen	83
9	Literaturverzeichnis.....	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsziel	6
Abbildung 2: Aufbau des Sachberichts	6
Abbildung 3: Grenzflächen einer verschmutzten Metalloberfläche [Haa96]	9
Abbildung 4: Partikelgrenzwerte in Systemen der Automobilindustrie [Roc13]	12
Abbildung 5: Einteilung der in der Produktion der Automobil- und Zuliefererindustrie relevanten Partikeln anhand des Werkstoffes und Eingruppierung in Materialklassen anhand der physikalischen Eigenschaften.....	15
Abbildung 6: Raumkonzept in Abhängigkeit der Partikelgröße	16
Abbildung 7: Methodenübersicht im Produktentstehungsprozess	17
Abbildung 8: Verfahren zur Analyse der Technischen Sauberkeit.....	20
Abbildung 9: Abklingkurve	21
Abbildung 10: a) Sinnerscher Kreis und b) Erweiterter Sinnerscher Kreis	27
Abbildung 11: Black Box Materialflussoperation	28
Abbildung 12: Gliederung der Dekompositionsebenen des Wertstroms	29
Abbildung 13: Veränderung des Sauberkeitszustandes entlang des Wertstroms	30
Abbildung 14: Wechselwirkungen im Wertstrom.....	31
Abbildung 15: Erweiterung des klassischen Wertstromdesigns um sauberkeitsrelevante Einflussgrößen	32
Abbildung 16: Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit	34
Abbildung 17: Produktbezogener Einflussfaktor: Krümmung der Oberfläche.....	37
Abbildung 18: Strömungsbedingte Problembereiche in Ecken	37
Abbildung 19: Materialflussoperationen	42
Abbildung 20: Gliederung innerbetrieblicher Materialflusssysteme	51
Abbildung 21: Mechanismen, welche zur Verschmutzung des Bauteils führen.....	52
Abbildung 22: Zwiebelprinzip entlang der Materialflussoperationen	53
Abbildung 23: Morphologisches Schema zu den Eigenschaften von Verpackungen und Ladungsträgern	55
Abbildung 24: Ablauf FMEA	60
Abbildung 25: Sauberkeitsgerechte Wertstromanalyse (FB: Folgebewertung)	63
Abbildung 26: Bewertungsbogen zur Folge des Einflussfaktors	64
Abbildung 27: Leitfaden zur sauberkeitsgerechten Gestaltung von Wertströmen	67
Abbildung 28: Schematischer Aufbau einer Partikelfalle	69
Abbildung 29: Morphologische Analyse KLT (offen)	71
Abbildung 30: Morphologische Analyse KLT mit Deckel.....	71

Abbildung 31: Morphologische Analyse Karton.....	72
Abbildung 32: Morphologische Analyse VCI-Beutel.....	72
Abbildung 33: Versuchsablauf unter Verwendung von Partikelfallen als Testbauteil	75
Abbildung 34: Diagramm der gemittelten Illig-Werte je Faktorstufenkombination	76
Abbildung 35: Partikel/Größenklasse (Lagerort 1)	77
Abbildung 36: Partikel/Größenklasse (Lagerort 2)	77
Abbildung 37: Partikel/Größenklasse (Lagerort 3)	77
Abbildung 38: Partikel/Größenklasse/Lagerort.....	77
Abbildung 39: Auswirkungen des Lagerorts (alle Partikel).....	78
Abbildung 40: Auswirkungen der Verpackungsart (alle Partikel)	78
Abbildung 41: Auswirkung des Lagerorts (metallische Partikel)	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beurteilung der Restschmutzmenge	13
Tabelle 2: Partikelgrößenklassen nach VDA-Band 19 und ISO 16232.....	14
Tabelle 3: Partikeltransportmechanismen und ihre Relevanz für die Bauteilverschmutzung ...	16
Tabelle 4: Überblick Analyseverfahren.....	22
Tabelle 5: Berechnung Illig-Wert	26
Tabelle 6: Erzeugte Partikel in Abhängigkeit von Bewegung.....	47
Tabelle 7: Verschmutzungsrisiken durch die Organisationsform der Reinigungsprozesse	50
Tabelle 8: Zusammenfassung der an Lagerort 1 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren	73
Tabelle 9: Zusammenfassung der an Lagerort 2 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren	73
Tabelle 10: Zusammenfassung der an Lagerort 3 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren	74
Tabelle 11: Vollfaktorieller Versuchsplan der experimentellen Untersuchung	75
Tabelle 12: Übersicht der gemittelten Illig-Werte (Testbauteil: Partikelfalle).....	76

Abkürzungsverzeichnis

AKL	Automatisches Kleinteilelager
c_n	Contamination Level
c_i	Contamination Level in Extraktionszyklus i
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Design of Experiments
E_B	Bindungsenergie
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTA	Fehlerbaumanalyse (Fault-Tree-Analysis)
KLT	Kleinladungsträger
μm	Mikrometer
nm	Nanometer
QFD	Quality Function Deployment
SPC	Statistische Prozessregelung (Statistical Process Control)
TecSa	Technische Sauberkeit
VCI	Volatile Corrosion Inhibitor
VDA	Verband der Automobilindustrie

1 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehen

1.1 Problemstellung

Sauberkeitsanforderungen an industriell gefertigte Bauteile haben in den letzten Jahren insbesondere in der Automobilindustrie, aber auch in weiteren Branchen wie der Elektroindustrie oder dem Maschinenbau, stark zugenommen [Deu08]. Durch die Entwicklung immer kleinerer und filigranerer Bauteile mit geringen Maßtoleranzen und hochwertigen Oberflächen steigt die Notwendigkeit, selbst kleinste Verschmutzungen prozesssicher von der Bauteiloberfläche zu entfernen [Kre10] und diesen Zustand entlang der Wertschöpfungskette aufrecht zu erhalten. Unter Verschmutzungen sind allgemein alle partikelförmigen, molekularen, nicht partikelförmigen oder biologischen Einheiten zu verstehen, die sich auf das Produkt oder den Prozess nachteilig auswirken können [DIN01].

Die Folgen von Verschmutzungen an einem Bauteil können sehr vielschichtig sein, wie z. B. schlecht haftende Beschichtungen, Funktionsminderungen der Teile, Probleme beim Fügen, wie Schweißen oder Kleben, optische Nachteile sowie verstopfte Bohrungen oder Gänge [Fra07]. Nicht partikelförmige Verschmutzungen in Form von Filmen, wie beispielweise Fett- oder Ölrückstände sowie Konservierungsmittel, beeinflussen die Oberflächenenergie von Bauteilen negativ, wodurch die Benetzbarkeit reduziert wird und Beschichtungen oder Lacke nicht haften [Sch09]. Partikelförmige Verschmutzungen hingegen sind vor allem bei medienführenden Systemen, wie z. B. hydraulische Bremsanlagen oder Kraftstoffeinspritzsystemen von großer Bedeutung, da sie Ventile oder Düsen zusetzen und somit zum Versagen der Systeme führen können [Roc06]. Durch diese Tatsachen wird das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit immer mehr als Leistungsanforderung in der Industrie angesehen und dessen Einhaltung gefordert [Bür13] [Kre09a] [Wol06]. Neben dem Terminus Technische Sauberkeit wird in Anlehnung an die Reinigungstechnik synonym der Begriff Reinheit verwendet. Im Folgenden soll hier Technische Sauberkeit (TecSa) als zentrale Begrifflichkeit verwendet, da sich diese in der Praxis etabliert hat.

Eine Studie der Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik aus dem Jahre 2012 zeigt, dass ein hoher Anteil der fertigen Bauteile in der Industrie Bauteilreinigungsanlagen in Ihre Wertströme integriert. Ein Großteil des Reinigungsaufwandes wird dabei direkt vor der Montage, als Zwischenreinigung oder Endreinigung, betrieben [Bil13]. Nicht zu vernachlässigen ist der dabei entstehende zeitliche und wirtschaftliche Aufwand. Die Studie zeigt ferner einen deutlichen Trend zur Intensivierung des Umweltschutzes und zur Einsparung von Energie. Die grundsätzliche Vermeidung der Reinigung wird dagegen kontrovers diskutiert, da in vielen Unternehmen die Meinung vorherrscht, dass es einfacher sei, Verschmutzungen abzureinigen als sie zu vermeiden [Bil13]. Auf der anderen Seite implementieren viele Unternehmen unterschiedlicher Größe und aus verschiedenen Branchen zurzeit Ganzheitliche Produktionssysteme. Ein Ganzheitliches Produktionssystem fokussiert sich im Kern auf die Vermeidung von jeglicher Art von Verschwendung [Spa03]. Eine der sieben Arten der Verschwendung ist die unnötige Bearbeitung eines Bauteils. Unter Einbeziehung aller Mitarbeiter wird dabei angestrebt, diese nicht erfor-

derlichen Schritte für die Herstellung eines Produktes möglichst zu eliminieren bzw. auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren [Deu07] [Wil96]. Somit ist ein Reinigungsprozess im Wertstrom, der durch organisatorische und technische Maßnahmen, wie z. B. die Vermeidung von Rückverschmutzung bei Materialflussoperationen, überflüssig sein könnte, im Sinne Ganzheitlicher Produktionssysteme, Verschwendung.

Zur Vermeidung von Verschmutzung bedarf es unterschiedlicher Methoden, wie z. B. Prozessanalysen, Technologiebewertungen, Prozessneuplanungen oder organisatorische Potentialanalysen [Hor99], die zielgerichtet eingesetzt werden müssen. Hierzu ist jedoch umfangreich zu analysieren, welche Faktoren und Rahmenbedingungen in einem Unternehmen bzw. einem speziellen Wertstrom einen Einfluss auf die Bauteilsauberkeit besitzen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Unternehmen einem stetigen Wandel unterliegen, bei dem sich die Rahmenbedingungen ändern, die Prozesse aber dennoch beherrschbar bleiben müssen [Wie09]. Vielfach liegen diese Faktoren nicht nur im eigentlichen Reinigungsprozess begründet, sondern werden bspw. auch in dem vor- und nachgelagerten Prozess, in der Gestalt des Bauteils, der technischen Integration in den Wertstrom verursacht [Sch09] [Kre09b] [Roc08]. Nicht zu vernachlässigen ist zudem die Frage nach der Verantwortung für die Bauteilsauberkeit im Wertstrom. Durch das komplexe Zusammenspiel der unterschiedlichen Einflussfaktoren sowie verschiedener Unternehmensbereiche haben alle Mitarbeiter die Verantwortung, das Qualitätsmerkmal „Bauteilsauberkeit“ zu erzielen und beizubehalten [Kre09b]. Faktoren, die diesbezüglich ineinander greifen und abgestimmt werden sollen, sind sowohl die Planung des Fertigungsverfahrens, des Designs, der Montage eines Produktes sowie die Gestaltung der Bearbeitungsumgebung [Dai10].

Auf die Erhaltung der durch Reinigungsprozesse erzielten Bauteilsauberkeit während der Montage wird in der Richtlinie VDA 19.2 [VDA19.2] des Verbands der Automobilindustrie eingegangen, um zu vermeiden, dass Partikelverschmutzungen im Enderzeugnis verbleiben. Hierbei werden Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Sauberkeit der Arbeitsumgebung in sauberkeitssensiblen Montagebereichen definiert, damit sichergestellt werden kann, dass ursprünglich saubere Bauteile nicht wieder neu verschmutzt werden. Zunächst werden dabei eine Gruppierung von Partikelquellen vorgenommen und Grundsätze zur Minimierung von störenden Partikeln formuliert. Außerdem werden Sauberkeitsbereiche klassifiziert, worauf aufbauend analysiert werden kann, welche Partikelquellen generell kritisch für die Funktion der gefertigten Erzeugnisse sind und es können Vorgaben für die sauberkeitsgerechte Montage definiert werden. Darüber hinaus schlägt die Richtlinie auch Empfehlungen für die Verwendung von Verpackungen und Behältern zur Erhaltung der Bauteilsauberkeit im Bereich der sauberkeitssensiblen Montage vor. Jedoch ist diese Richtlinie an die Bedürfnisse der Automobilindustrie angepasst und berücksichtigt ausnahmslos partikelförmige Verschmutzungen. Zudem ist die Richtlinie nur für den Bereich der Montage gültig und bietet somit ebenfalls kein durchgängiges Sauberkeitskonzept entlang des gesamten Wertstroms und den hierbei erforderlichen Materialflussoperationen.

Neben den Veröffentlichungen von Forschungsarbeiten existieren nur wenige Grundlagenbücher zum Thema Technische Sauberkeit. Diese geben einen Überblick über die verschiede-

nen Techniken und Verfahren zur Bauteilreinigung, allerdings mit einem geringeren Detaillierungsgrad, als es in den Forschungsarbeiten der Fall ist. In der deutschsprachigen Literatur ist hierbei vor allem das Buch „Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie“ von Jelinek zu erwähnen [Jel99]. Ziel des Buches ist die Bereitstellung der erforderlichen Informationen für die Wahl eines Reinigungsverfahrens und dessen Auslegung für Reinigungsfachleute und Fertigungsplaner. Die nach dem Fertigungsprozess erforderliche Zwischen- und Endreinigung erfordert im Vorfeld eine Planung, bei der verschiedene Parameter und Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen. Um diese Einflussgrößen genauer zu spezifizieren, wurden u. a. von Aurich [Aur09] verschiedene Reinigungsversuche mit einem Spritzreinigungsverfahren durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere überprüft, inwieweit die Reinigungszeit, die Lagerungszeit und der Magnetisierungsgrad des Bauteils einen Einfluss auf das Reinigungsergebnis haben und inwieweit diese bei der Planung des Reinigungsprozesses berücksichtigt werden sollen. Die Ergebnisse zeigten, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Reinigungszeit und dem Reinigungsergebnis besteht. Allgemein wurde festgestellt, dass sich größere Partikel in einer kürzeren Zeit abreinigen lassen. Zusätzlich wurde festgestellt, dass sich ab einer bestimmten Reinigungszeit nur noch eine geringere Verbesserung des Reinigungsergebnisses erzielen lässt. Darüber hinaus ergaben die Versuche, dass eine Magnetisierung des abzureinigenden Bauteils bewirkt, dass Späne unter Umständen stärker am Bauteil haften, was den Reinigungsprozess erschwert. Der Einfluss der Lagerungszeit von Bauteilen auf das Reinigungsergebnis konnte in dem Projekt nicht bestimmt werden, so dass an dieser Stelle weitere Forschungsarbeiten erforderlich sind.

Ein weiterer Aspekt, der einen großen Einfluss auf die Erhaltung der Bauteilsauberkeit und somit auf die Reduzierung des Reinigungsaufwands hat, ist die Logistik und hier insbesondere inner- und außerbetriebliche Materialflussoperationen sowie die hierfür eingesetzten technischen Mittel, wie z. B. Behälter und Verpackungsmaterialien [Sch06]. Sofern diese nicht gemäß der Sauberkeitsanforderung ausgelegt sind, können Bauteile rückverschmutzt werden, indem z. B. die Behälter keine ausreichende Schutzwirkung gegenüber Schmutz aus der Umgebung bieten oder aber selbst verschmutzt sind bzw. durch Abrieb an der Oberfläche Verschmutzung erzeugen und diese auf die Bauteile übertragen werden. Ebenso haben Lager- und Transportmittel einen Einfluss auf die Bauteilsauberkeit, wenn sich z. B. ein Lager ohne trennende Schutzeinrichtung in unmittelbarer räumlicher Nähe zu spanenden Fertigungsprozessen, bei denen partikuläre Verschmutzungen entstehen, befindet. Zudem besteht die Gefahr, dass ungeeignete Transportmittel bei innerbetrieblichen Materialflussoperationen Verschmutzungen (z. B. Staub) aufwirbeln, die sich wiederum auf den Bauteilen absetzen können [Sch06]. So zählt Staub aus der Umwelt mit 27%, neben Metallspänen und Schleifstaub zu den drei häufigsten zu entfernenden partikulären Verschmutzungen [Bil13].

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, wie wichtig der bisher wenig beachtete Aspekt der Logistik für die Bauteilsauberkeit entlang des Wertstroms ist. Nur durch eine detaillierte Planung der inner- und außerbetrieblichen Materialflussoperationen hinsichtlich der Erhaltung der Bauteilsauberkeit kann sichergestellt werden, dass ein Kunde die gewünschten Teile mit dem von ihm verlangten Sauberkeitsgrad erhält.

Dabei bietet eine durchgängige, wertstromorientierte Planung der Bauteilsauberkeit unter Einbeziehung der Materialflussoperationen erhebliche Vorteile gegenüber den bisher ausschließlich isolierten Betrachtungen, die jedoch offensichtlich einen Zusammenhang untereinander aufweisen und aufeinander aufbauen. Denn nur durch Berücksichtigung sämtlicher sauberkeitsrelevanter Einflussgrößen lassen sich branchen- und bauteilangepasste Sauberkeitskonzepte entwickeln [Aur06]. Ein solches funktionierendes Sauberkeitskonzept steht dabei eng mit einer effizienten bzw. sogenannten Null-Fehler-Produktion in Verbindung, die auch innerbetriebliche Materialflussoperationen mit einschließt. Die Vermeidung von Verschmutzung stellt neben der Optimierung bestehender Anlagen, Schulung von Mitarbeitern, Zeiteinsparmaßnahmen und Kontrolle der Reinigungsergebnisse eine der größten Herausforderungen für die kommenden Jahre im Hinblick auf die Reinigungstechnik dar [Fra07]. Materialflussoperationen, bei denen die Erhaltung der Bauteilsauberkeit entlang des Wertstroms gewährleistet werden müssen, nehmen dabei eine Schlüsselposition ein.

Deshalb ist es erforderlich, Materialflüsse zu betrachten und durch eine anforderungsgerechte Gestaltung der hierbei eingesetzten Mittel [Jün99] die Erhaltung einmal erreichter Sauberkeitszustände sicherzustellen [Fit05] [Wie09]. Durch den Einsatz an die Sauberkeitsanforderungen angepasster Mittel des Materialflusses, wie z. B. Behälter, Schutzverpackung etc., kann prozessorientiert der Reinigungsaufwand minimiert und somit die Herstellkosten reduziert werden. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen bedeutet eine Minimierung des Reinigungsaufwandes eine erhebliche Einsparung an Energie und Ressourcen, wodurch eine nachhaltige Prozessgestaltung gewährleistet wird.

Für die Überprüfung der Materialflussoperationen hinsichtlich der Bauteilsauberkeit und für die Umsetzung eines sauberkeitsgerechten Materialflusses fehlt es vor allem kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) an standardisierten Methoden. Aus diesem Grund sind die Verbreitung und der Einsatz durchgängiger Konzepte für sauberkeitsgerechte Materialflüsse in diesen Unternehmen nahezu nicht vorhanden. Aber auch mittelständische und Großunternehmen stehen zurzeit vor der großen Herausforderung, sich an die aktuellen und zukünftigen Sauberkeitsanforderungen anzupassen. Auch ihnen fehlen oftmals Informationen sowie Handlungsempfehlungen zur sauberkeitsgerechten Produktion und zum Transport ihrer Bauteile [Roc09]. Durch diese zunehmende Bedeutung des Qualitätsmerkmals der Bauteilsauberkeit für die produzierende Industrie ist es zwingend erforderlich, eine Methode zu entwickeln, mit denen KMU in die Lage versetzt werden, auf die zukünftigen Anforderungen hinsichtlich der geforderten Bauteilsauberkeit bei Materialflussoperationen zu reagieren. Dabei müssen die zu entwickelnden Konzepte an das Methoden- und Organisationsniveau der KMU angepasst werden. Dies beinhaltet, dass sie ohne spezielle Fachabteilung anwendbar sind und die finanziellen Aufwände gering und von allen Mitarbeitern im Unternehmen akzeptiert und angewandt werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Leitfadens zur Überprüfung und Planung der innerbetrieblichen Materialflussoperationen im Hinblick auf die technische Bauteilsauberkeit.

Mit Hilfe des zu entwickelnden Leitfadens sollen KMU unterschiedlicher Branchen befähigt werden, ihre bestehenden Materialflussoperationen hinsichtlich Sauberheitskriterien kritisch zu analysieren, um Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Zudem besteht mit Hilfe des Leitfadens die Möglichkeit, bei der Neuplanung von Wertströmen die notwendigen Materialflussoperationen von Anfang an sauberkeitsgerecht zu gestalten.

Da der Leitfaden eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren und Rahmenbedingungen berücksichtigen muss, zwischen denen unterschiedliche Wirkzusammenhänge bestehen, werden im Verlauf des Berichtes folgende Fragestellungen beantwortet:

- Welche spezifischen Anforderungen bezüglich der Bauteilsauberkeit werden an die Materialflussoperationen und die hierfür eingesetzten technischen Mittel gestellt?
- Welche Einflussfaktoren auf das Risiko der Rückverschmutzungen innerhalb von Prozessen bestehen?
- Wie sind diese Verschmutzungen zu erfassen und deren Risiko zu bewerten?
- Welche Voraussetzungen sind zu beachten, damit der Leitfaden in die Planungsphase bzw. in Optimierungsprojekte eingegliedert und genutzt werden kann?

Der Leitfaden sollte zudem erweiterbar, modifizierbar und aktualisierbar sein, um eine kontinuierliche Anpassung an steigende Sauberkeitsanforderungen über das Projektende hinaus zu ermöglichen.

In Abbildung 1 ist das Forschungsziel schemenhaft dargestellt. Für die Analyse der Materialflussoperationen müssen die Anwender zunächst in die Lage versetzt werden, ihren zu analysierenden Wertstrom mit einer geeigneten Methodik abzubilden. Voraussetzung ist eine Methodik, mit der sowohl die einzelnen Fertigungs- und Montageprozesse als auch die verknüpfenden Materialflussoperationen dargestellt werden können. Zudem soll die Methodik die Möglichkeit eröffnen, Sauberkeitsanforderungen einzelner Prozesse gleichermaßen zu erfassen. Für den Anwendungsfall der kritischen Überprüfung der Materialflussoperationen hinsichtlich der Erhaltung definierter Sauberkeitszustände müssen Möglichkeiten vorhanden sein, Schwachstellen zu identifizieren und analysierbar zu machen.

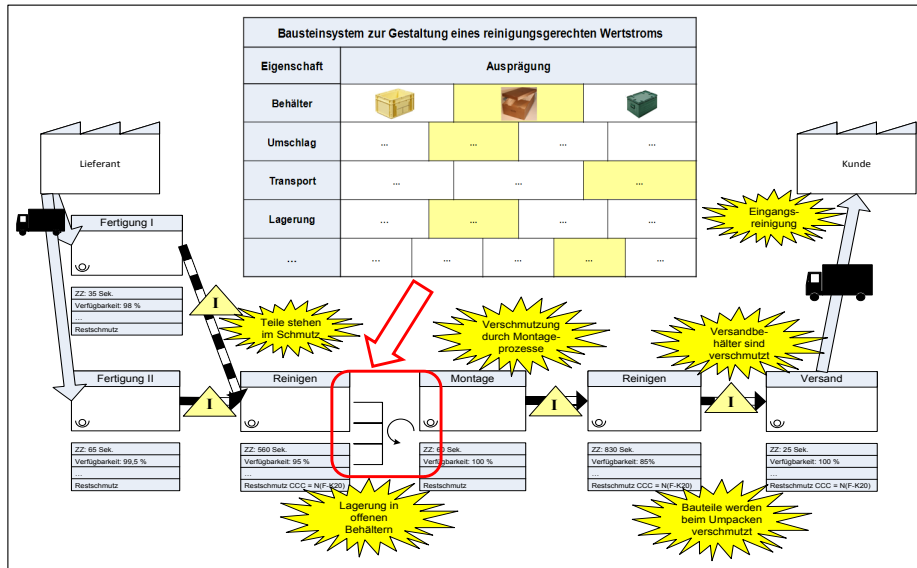


Abbildung 1: Forschungsziel

Der Sachbericht baut auf einer umfassenden Darstellung der Bedeutung der Technischen Sauberkeit auf und stellt die derzeitigen Sauberkeitsanforderungen in der industriellen Fertigung dar (Abbildung 2). Zusammen mit dem systemtheoretischen Ansatz der Produktionssystemmodellierung stellen diese die Grundlagen für den Aufbau des Leitfadens dar.

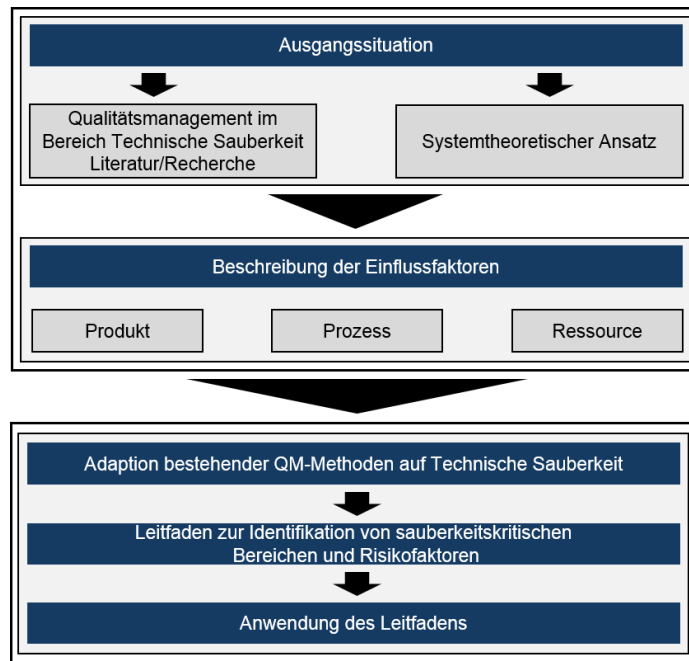


Abbildung 2: Aufbau des Sachberichts

Damit die Erkenntnisse des Forschungsprojekts unmittelbar in die Praxis umgesetzt und insbesondere von KMU genutzt werden können, bedarf es einer wissenschaftlich strukturierten Vorbereitung. Zur Erarbeitung des umfangreichen, unternehmens- und branchenneutralen sowie individuell erweiterbaren Leitfadens, gilt es, eine wissenschaftliche Betrachtung der möglichen Einflussgrößen und Rahmenbedingungen durchzuführen (Abbildung 1). Diese Un-

tersuchung bildet die Datengrundlage für eine systematische Risikobewertung von saubereitsgerechten Wertströmen.

Zur vereinfachten Integration der Risikobewertung in die bestehenden Planungsprozesse der Unternehmen werden etablierte Methoden des Qualitätsmanagements auf die Belange der Technischen Sauberkeit adaptiert und in einen Leitfaden zur Modellierung und Analyse saubereitsgerechter Wertströme implementiert. Abschließend erfolgt eine Untersuchung der Wechselwirkungen der identifizierten Einflussgrößen anhand repräsentativer Mittel des Materialflusses.

Für die Wissenschaft stellt diese ergebnisorientierte Betrachtungsweise eine hervorragende Möglichkeit dar, die Wissensbasis des bisher unzureichend erforschten Themenfeldes der Technischen Sauberkeit in der Logistik [Kre09a] strukturiert zu erweitern und gleichzeitig mit fundierten Analysen zu untermauern. Zudem ist es möglich, die Ergebnisse der Untersuchungen in weitere Disziplinen der Prozessplanung zu überführen und somit ggf. Schlussfolgerungen für andere angeschlossene Bereiche, wie die der Konstruktion und der Fabrikplanung, zu erzielen.

2 Stand der Technik

Ungenügende Bauteilsauberkeit führt nicht nur zu Reklamationen des Endkunden, sondern kann sich je nach Prozessanforderungen negativ auf Folgeprozesse, wie Beschichtungs- und Lackierprozesse, auswirken. Zudem steigt durch Nichteinhaltung der Sauberkeitsanforderungen die Notwendigkeit der Nacharbeit und damit die Erzeugung von Verschwendung [Bil13]. Um den aktuellen und zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden und eine effiziente und sauberkeitsgerechte Planung zu ermöglichen, ist der Fokus von der reinen Betrachtung des Reinigungsprozesses auf den gesamten Wertstrom zu erweitern [Kre09b].

Nachstehend sollen dazu der Begriff Technische Sauberkeit definiert und maßgebliche Anforderungen im Kontext der Technischen Sauberkeit vorgestellt werden. Anschließend steht das Qualitätsmanagement im Fokus, wobei auf Messung, Analyse und Erzeugung der Technischen Sauberkeit eingegangen wird.

2.1 Das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit

Die geforderte Qualität eines Produktes wird ausschließlich vom Kunden definiert. In der industriellen Fertigung wird unter dem Begriff Qualität der „Grad, in dem ein Satz inhärente Merkmale Anforderungen erfüllt“ definiert. [DIN05]. Ein solches Merkmal ist die Technische Sauberkeit. Zunehmend werden in der industriellen Praxis Anforderungen an die Technische Sauberkeit von Bauteilen definiert. Dabei stellt sich jedoch die Frage, wann ein Bauteil als sauber gilt und welches Sauberkeitsniveau erforderlich ist. [Wit88].

In diesem Kapitel soll zunächst der Begriff Technische Sauberkeit im Kontext der industriellen Fertigung beleuchtet werden, um im Anschluss die Relevanz der Technischen Sauberkeit als Qualitätsmerkmal aufzuzeigen.

2.2 Aufbau der Verschmutzungen eines Bauteils

Grundsätzlich besitzt jede verschmutzte Bauteiloberfläche einen schichtartigen Aufbau mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Jede Schicht kann sich dabei unterschiedlich auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen auswirken. (Abbildung 3).

An den Grundwerkstoff grenzt die verformte Schicht, welche durch vorgehende Bearbeitungsvorgänge hervorgerufen wird.

Die auf die verformte Schicht folgende Reaktionsschicht besteht aus Reaktionsprodukten des Grundwerkstoffes, üblicherweise Oxiden. Durch das Eingehen chemischer Verbindungen des Grundwerkstoffes mit der umgebenden Atmosphäre, ist ein Abreinigen dieser Schicht oftmals nur mit hohem Aufwand zu realisieren. Meist ist dazu der Einsatz abtragender Verfahren, wie bspw. Beizen oder Strahlen notwendig. Häufig bildet die Reaktionsschicht jedoch eine erwünschte Schutzschicht gegen äußere Einflüsse oder ihr Vorhandensein kann aus anderen Gründen akzeptiert oder gewünscht sein.

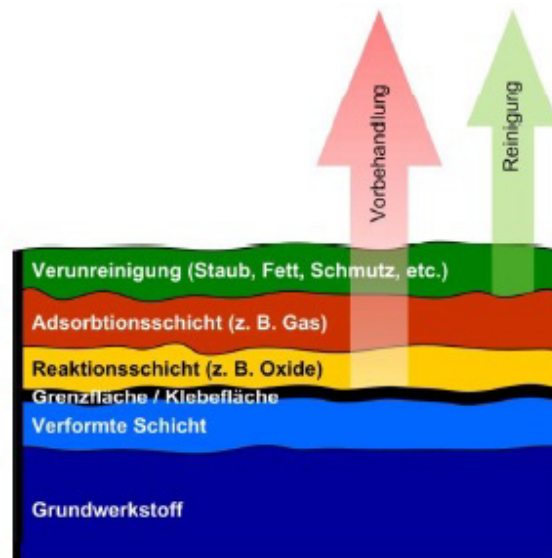


Abbildung 3: Grenzflächen einer verschmutzten Metalloberfläche [Haa96]

Während die verformte Schicht und die Reaktionsschicht dem Grundwerkstoff zugeordnet werden können, besteht die an die Reaktionsschicht grenzende Adsorptionsschicht aus werkstofffremden Substanzen. Die Fremdstoffe haben ebenfalls eine hohe Bindungsenergie und sind schwerer zu entfernen als die Stoffe in der Verschmutzungsschicht. Ein weiteres Problem ist die Tatsache, dass an der Bauteiloberfläche unmittelbar nach der Reinigung wieder Gasteilchen aus der Umgebungsatmosphäre adsorbieren und so eine Entfernung der Adsorptionsschicht nur sehr kurzzeitig vorhält. Während die Adsorptionsschicht nur wenige nm dick ist, bilden die auf der äußeren Schicht befindlichen Verschmutzungen Schichtdicken von mehreren μm aus. Den Reinigungsverfahren (Kapitel 2.6.2) kommt in erster Linie die Aufgabe zu, diese Verschmutzungsschicht möglichst effektiv zu entfernen. Um dies zu erreichen, muss die Bindungsenergie E_B überwunden werden, wobei der Energieeintrag, je nach Art des Reinigungsverfahrens, mechanisch, thermisch oder chemisch durch das Reinigungsmittel erfolgen kann [Ama95] [Bau14].

2.3 Begriffsbestimmung Technische Sauberkeit

Wie die Betrachtung der Grenzschichten einer verunreinigten Oberfläche zeigt, lassen sich absolut reine Oberflächen nur unter Laborbedingungen und mit hohem Aufwand erzeugen. [Jel99]. Für einen Großteil technischer Systeme im Automobil, Maschinen- und Anlagenbau ist das Entfernen jeglicher Verschmutzungen weder wirtschaftlich noch erforderlich.

Für technische Anwendungen sind grundsätzlich Verschmutzungen von Interesse, die die geforderte Qualität der Bauteile beeinträchtigen können. Die Definition von Qualitätsmerkmalen liegt in der Sicherstellung bestimmter Produktanforderungen hinsichtlich

- Lebensdauer
- Verwendung

- Weiterverarbeitung
- Weiterbearbeitung

begründet [Jel99]. Der Terminus Technische Sauberkeit findet Anwendung, wenn es bspw. durch unerwünschte Partikel auf Bauteilen oder in Systemen zu Funktionsbeeinträchtigungen bis hin zum Ausfall einer Komponente kommen kann [Roc10]. Nach Bilz und Krieg ist ein Bauteil sauber, wenn störende Verschmutzungen entfernt wurden [Bil09]. Verschmutzungen lassen sich damit als unerwünschtes Material bezeichnen [MIL94]. Technische Sauberkeit lässt sich somit allgemein als „die Abwesenheit kritischer Verschmutzungen“ definieren, welche sich negativ auf die Bauteilqualität auswirken können [Jel99] [Sch10a] [ZVE14].

Die „dekorative Sauberkeit“ bezeichnet im Gegensatz dazu, dass die optische Anmutung eines Produkts durch Partikelverschmutzungen beeinträchtigt wird [Roc10]. Ferner wird in der Literatur eine Unterscheidung zwischen Verschmutzung und Kontamination getroffen. Da sich, wie in Abbildung 3 gezeigt eine Vielzahl von Verschmutzungen auf der Bauteiloberfläche befinden können, bezeichnet der Begriff Kontamination die für die Funktionalität des Bauteils kritischen Verschmutzungen [Sch10a]. Eine Kontamination grenzt sich also von einer Verschmutzung durch die negative Auswirkung auf die Funktionalität des Bauteils ab.

Aufgrund des Einflusses auf die Sicherstellung der Produkthanforderungen von Komponenten und Baugruppen hat sich die Technische Sauberkeit, insbesondere der Zuliefererkette der Automobilindustrie, als ein verbindliches Qualitätsmerkmal etabliert“ [vgl. Grossmann 2003]. Die Technische Sauberkeit lässt sich somit als Qualitätsmerkmal begreifen, welches es zu definieren, zu steuern, zu erzeugen und zu erhalten gilt [Ern07].

Bei der Produktion von Teilen lassen sich Veränderungen des Sauberkeitszustandes nicht vermeiden, bspw. bei der spanenden Bearbeitung von Werkstücken. Nur durch eine prozesssichere Reinigung der Teile kann die funktionell notwendige Sauberkeit hergestellt werden [Roc11]. Sobald die Bauteile die Reinigungsanlage verlassen, können diese durch unterschiedliche Faktoren wieder verschmutzt werden. Dieser Prozess wird als Rückverschmutzung bezeichnet. Dabei bleibt festzuhalten, dass mit höheren Anforderungen an die technische Sauberkeit nicht nur potentiell der Reinigungsaufwand steigt, sondern auch der Aufwand zum Erhalt einmal erreichter Sauberkeitszustände. [Roc14b].

Die auf Bauteilen vorhandenen Verschmutzungen können sehr unterschiedliche Ausprägungen haben. Kloke klassifiziert dazu 22 Gruppen von Verschmutzungen [Klo03], welche sich nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden und zur Beschreibung einer Verschmutzung kombiniert werden können. Nach Schmauz kann grundsätzlich in chemische, physikalische, biologische und radiologische Verschmutzungen differenziert werden [Sch10a]. Richard vereinfacht diese Klassifizierung indem er lediglich zwischen partikulären und filmischen Verschmutzungen unterscheidet [Ric 09]. Eine weitere Differenzierung ist die Einteilung in partikuläre und nicht partikuläre Verschmutzung, die insbesondere in der Automobilindustrie weit verbreitet ist und im Weiteren aufgegriffen wird.

2.3.1 Partikuläre Verschmutzungen

Gemäß VDA 19 sind Partikel feste Körper aus Metall, Kunststoff, Mineralien, Gummi oder Salzen. Pastöse Anteile gelten nicht als Partikel [VDA19]. Partikel gehören dabei zu den physikalischen Verschmutzungen und sind einzeln vorliegende Teilchen in festem Zustand [Sch10b]. Partikel können dabei in metallisch (Späne) und nicht-metallisch (Staubpartikel, Korund oder Fasern) untergliedert werden. Nicht-metallische Partikel, welche ein sehr großes Längen-Breiten-Verhältnis aufweisen, werden als Fasern bezeichnet. [Gom98]. Partikuläre Verschmutzungen sind die Verschmutzungen, welche aufgrund ihres einerseits hohen Schädigungspotentials insbesondere in filigranen Bauteilen, andererseits durch die vielfältigen Quellen im industriellen Umfeld am häufigsten betrachtet werden müssen [Bil13]. Das Schädigungspotential durch die drei häufigsten Vertreter partikulärer Verschmutzungen, Metallspäne, Schleifstaub-/Strahlmittelrückstände und Staub aus der Umwelt führen neben der generellen Verkürzung der Produktlebensdauer zu Fehlerbildern, wie Verstopfungen, Verklemmungen, Beschädigungen, Leckagen und Kurzschlüssen [Sch10b] [Bil13]. Ob ein Partikel Schädigungspotential hat, wird im Wesentlichen durch dessen Größe, Anzahl und Material determiniert (vgl. Kapitel 2.4).

2.3.2 Nicht partikuläre Verschmutzungen

Unter nicht partikulären oder filmischen Verschmutzungen werden an der Bauteiloberfläche anhaftende dünne, organische Schichten verstanden. Diese lassen sich in Filme, Beläge und Schichten einteilen. Neben Ölen und Fetten handelt es sich dabei um Rückstände aus vorgelegerten Prozessen, wie bspw. Kühlschmierstoffe oder Waschmittelbestandteile [LPW12].

Diese Art der Verschmutzung kann sich negativ auf anschließende Lackier-, Galvanisier- und Klebprozesse auswirken. In der Praxis ist diese Art der Verschmutzung i.d.R. sehr gut deren Quellen zuordenbar. Da diese somit gut erkannt und in der Planungsphase kalkuliert werden können, wird in der Praxis im Hinblick auf eine Risikobewertung der Einflussgrößen, welche zu nicht partikulären Verschmutzungen führen, weniger Wert gelegt. Aus diesem Grund fokussiert sich die vorliegende Untersuchung vordergründig auf die Analyse der Rückverschmutzungsrisiken durch partikuläre Verschmutzungen.

2.4 Sauberkeitsgrenzwerte

Können partikuläre Verschmutzungen die Funktion einer Komponente beeinträchtigen, so wird die Komponente als sauberkeitskritisch bezeichnet [Sch10b]. Aus diesem Grund werden die Komponente sowie deren Bestandteile mit Anforderungen an die Technische Sauberkeit belegt. Dabei ist die Bestimmung der tolerierbaren Verunreinigungsmenge auf den relevanten Bauteiloberflächen entscheidend, da sie direkt die Grenzwerte und ferner die Anforderungen an die Fertigungsumgebung, die Reinigungs- und die Materialflussoperationen definiert. Sauberkeitsgrenzwerte legen demnach fest, welche Verschmutzungen toleriert werden können und an welcher Stelle im Wertstrom diese partikulären Verschmutzungen beseitigt werden müssen. Sie bestimmen damit die Robustheit des Bauteils gegenüber Veränderungen des Sauberkeitszustandes. Sind die auf dem Bauteil verbleibenden Verschmutzungen so gering, dass sie unterhalb der festgelegten Grenzwerte liegen, gilt das Bauteil als technisch sauber.

Die definierten Grenzwerte für partikuläre Verschmutzungen in einzelnen Industriezweigen variieren dabei sehr stark. In der Halbleiterindustrie führen Partikelgrößen von $0,01 \mu\text{m}$ zu Funktionseinschränkungen [Hor12]. Im Vergleich dazu gelten innerhalb der Pharma-, Medizin- und Lebensmittelindustrie Partikel, die größer als $0,3 \mu\text{m}$ sind, als kritisch [Hol12]. Demgegenüber wirkt die Einstufung kritischer Partikelgrößen ab $5 \mu\text{m}$ innerhalb der VDA19.2 als vergleichsweise beherrschbar, wobei sich in der Automobilindustrie und im Maschinenbau Sauberkeitsgrenzwerte ab $200 \mu\text{m}$ in vielen Fällen als ausreichend erwiesen haben (vgl. Abbildung 4) [VDA19.2]. In diesem Bereich sind jedoch aufgrund der gegebenen Wettbewerbsbedingungen sowie den Qualitätsanforderungen an die Technische Sauberkeit Lösungen erforderlich, welche mit vertretbarem Aufwand die Technische Sauberkeit sicherstellen. Vertretbarer Aufwand bedeutet in diesem Fall die bedarfsgerechte Anpassung der Fertigungsbereiche und Einrichtungen an die gegebenen Sauberkeitsanforderungen. Dazu ist es erforderlich, das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit bereits frühzeitig in die Produkt- und Produktionsplanung mit einzubeziehen.

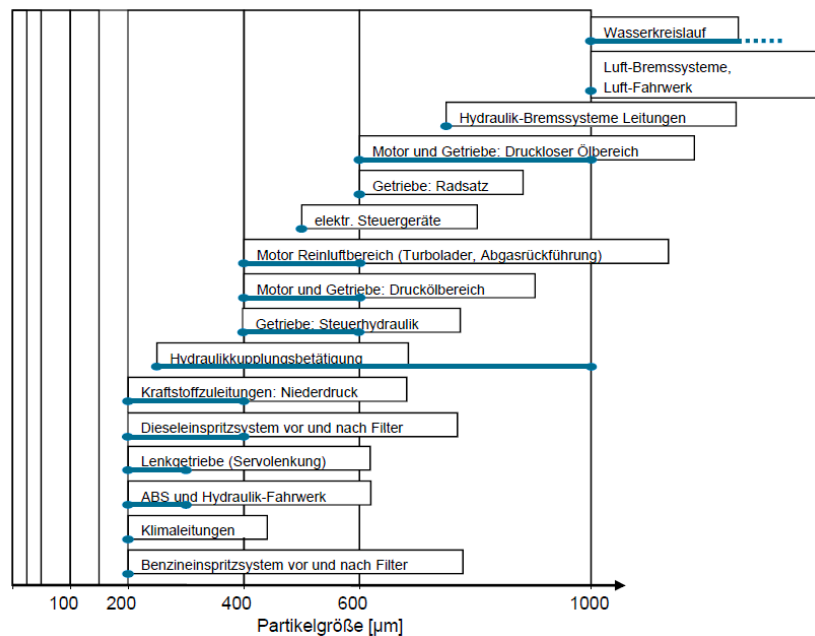


Abbildung 4: Partikelgrenzwerte in Systemen der Automobilindustrie [Roc13]

Die Ableitung kritischer Partikelverschmutzungen erfolgt durch die Bewertung der geometrischen Merkmale (z.B. Bohrungsdurchmesser), der Analyse von Ausfällen und Schäden, Schadpartikelversuchen oder durch geeignete Simulationsmodelle. Häufig werden dabei Grenzwerte für das Enderzeugnis vom Endkunden vorgegeben, welche dann auf Einzelteile und Einzelprozesse heruntergebrochen werden müssen [Kra14].

Zur Charakterisierung der Schmutzmenge auf einem Bauteil bestehen unterschiedliche Ansätze. Um die Schmutzmenge zahlenmäßig zu erfassen, sind aufwändige Laboranalysen erforderlich [Klo03] (Vgl. Kapitel 2.6.1). Da diese Untersuchungen in frühen Planungsphasen nicht durchführbar sind, erfolgt dort eine grobe Einteilung in vier Klassen. Die Abgrenzung der einzelnen Kategorien basiert dabei auf der visuellen Beurteilung der Bauteile.

Tabelle 1: Beurteilung der Restschmutzmenge [Klo03]

Beurteilung der Schmutzmenge
Bauteile stehen in Öl/Schmutz
Bauteile sind stark verschmutzt
Bauteile sind leicht verschmutzt
Bauteile sind nach Augenschein sauber

Die Einteilung der Schmutzmenge nach [Klo03] dient der Abschätzung des erzeugten Sauberkeitszustandes der Transformationsprozesse in Produktionsplanungsphasen. Daraus abgeleitet kann der Reinigungsbedarf und die damit verbundenen Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sauberkeitsniveaus abgeleitet werden.

Eine exaktere Grenzwertbestimmung erfolgt durch die Angabe der Partikelmerkmale Masse, Größe, Anzahl und Material [Dai04] [Pfe13].

- **Gesamtmasse aller Partikel [mg]**

Die Gesamtmasse aller auf den relevanten Bauteiloberflächen befindlichen Partikel darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Die Angabe der Gesamtmasse lässt jedoch keine Aussage über die Größe, das Material, die Art und Anzahl der Partikel zu. Die durch gravimetrische Messung zu ermittelnde Gesamtpartikelmasse wird aus diesem Grund primär zur Überwachung des Sauberkeitsniveaus von stärker verunreinigten Komponenten eingesetzt [Sch10a].

- **Maximale Partikelgröße**

Diese Reglementierung der Partikelgröße beruht auf der Annahme, dass große Partikel ein höheres Schädigungspotential mit sich bringen als kleine Partikel. Wird nur das größte Partikel reglementiert, dürfen sich keine Partikel auf der relevanten Bauteiloberfläche befinden, dessen maximale Ausdehnung den Grenzwert überschreitet. Alle Partikel, die kleiner sind, werden nicht berücksichtigt.

Messtechnisch wird die Partikelgröße durch die Annäherung des sog. Feret-max Durchmessers ermittelt. Dieser Durchmesser ist der maximale Abstand zweier paralleler Tangenten, die an den gegenüberliegenden Seiten des Partikels anliegen. Schmauz nennt ferner eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Partikelgröße durch das Prinzip des äquivalenten optischen Kreisdurchmessers. Die Partikelgröße entspricht dabei dem Durchmesser eines ideal runden Kreises mit dem Flächeninhalt eines willkürlich geformten Partikels [Sch10a].

- **Partikelgrößenklassen**

Zusätzlich zur Angabe des größten Partikels kann die Anzahl definierter Größenbereiche reglementiert werden. In der aktuellen Version der VDA 19 und der ISO 16232 sind diskrete Partikelgrößenklassen von 5 bis 1000 µm definiert (vgl. Tabelle 2)

Tabelle 2: Partikelgrößenklassen nach VDA-Band 19 und ISO 16232

Größenklasse	Größe x [μm]		
B	5	bis <	15
C	15	bis <	25
D	25	bis <	50
E	50	bis <	100
F	100	bis <	150
G	150	bis <	200
H	200	bis <	400
I	400	bis <	600
J	600	bis <	1000
K		\geq	1000

Durch die Zuordnung eines Großbuchstabens wird die Größenklasse gekennzeichnet. Je nach Anforderungen des Kunden kann je Größenklasse die maximal zulässige Anzahl an Partikeln festgelegt werden. Allgemein wird der Trend weg von der Gesamtmassenangabe der Partikel sowie der reinen Größenbeschränkung hin zu einer Verteilung der Partikel in Größenklassen festgestellt [ZVE14].

- **Partikelmaterial**

Neben der Partikelgröße ist das Partikelmaterial die zweite relevante Angabe bei der Grenzwertfestlegung. Abhängig vom Gesamtsystem können sich spezifische Eigenschaften des Partikelmaterials (Leitfähigkeit, Härte) negativ auf das System auswirken [Pfe13]. Eine Einteilung von Partikeln anhand des Werkstoffes und deren physikalischer Eigenschaften nimmt Schmauz vor (Abbildung 5). Dabei gliedert er die partikuläre Kontamination in vier Materialklassen, welche sich in ihrer Ausdehnung, der Härte und elektrischer Leitfähigkeit unterscheiden.

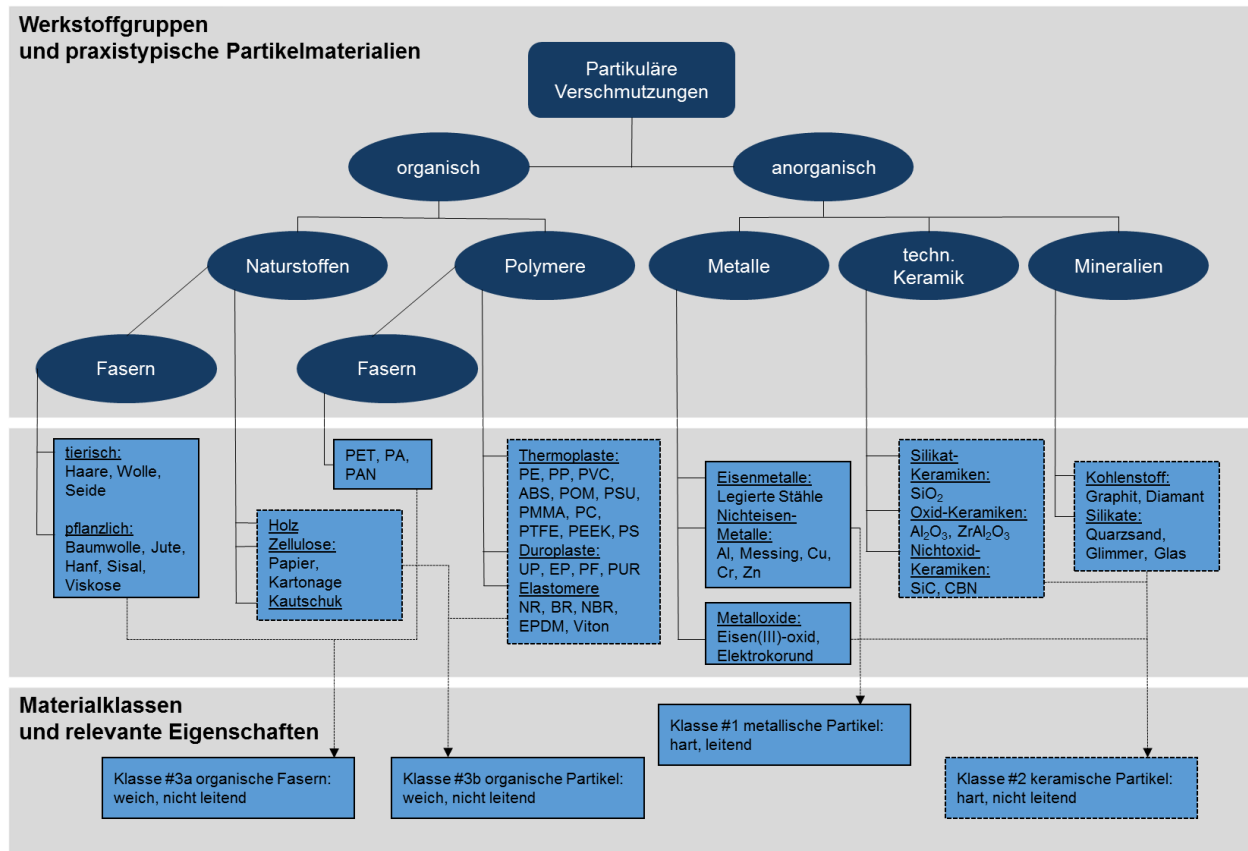


Abbildung 5: Einteilung der in der Produktion der Automobil- und Zuliefererindustrie relevanten Partikel anhand des Werkstoffes und Eingruppierung in Materialklassen anhand der physikalischen Eigenschaften [i.A.a. Sch10a]

So werden anwendungsbezogen auf elektrischen Komponenten Klasse #1 Partikel aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit ab einer Größe, bei der die maximale Abmessung größer ist, als der Abstand der Leiterbahnen in der Grenzwertdefinition ausgeschlossen, während nicht metallische Partikel nicht reglementiert werden. In Verbrennungsräumen sind organische Partikel weniger relevant, da diese bei der Inbetriebnahme verbrannt werden, wohingegen harte, metallische Partikel ein Versagen oder Verklemmen einzelner Komponenten hervorrufen können [Pil10]. Bei der Festlegung von Grenzwerten für technische Systeme werden deshalb Größen- und Härteeinschränkungen oder Größen- und Materialeinschränkungen kombiniert.

Die Größe und die Materialeigenschaften bestimmen darüber hinaus die Ausbreitung der Partikel in der Umgebung. Welche physikalischen Gesetzmäßigkeiten dabei zum Tragen kommen, beschreibt das folgende Kapitel.

2.5 Ausbreitung partikulärer Verschmutzungen

Die für die Automobilindustrie sowie für den Maschinenbau relevanten Partikel im Größenbereich zwischen 200 und 1000 μm folgen nach ihrer Entstehung und Freisetzung i.d.R. ihrem Impuls und der Schwerkraft (ballistische Partikel) [VDA19.2]. Erst wenn die Partikel sehr klein oder das Partikelmaterial sehr leicht wird, werden die Partikel luftgetragen und können sich

durch z. B. die Brownsche Molekularbewegung über längere Zeit in der Umgebungsluft halten und mobil bleiben (Tabelle 3).

Tabelle 3: Partikeltransportmechanismen und ihre Relevanz für die Bauteilverschmutzung [VDA19.2]

Partikeltransportmechanismus	Relevanz für die Rückverschmutzung von Bauteilen speziell für die Automobilindustrie
Transport über die Umgebungsluft	gering
ballistische Ausbreitung	hoch aber lokal begrenzt
Schwerkraft	sehr hoch aber lokal begrenzt
Verschleppung über Oberflächen oder Personal	hoch

Das in Abbildung 6 beschriebene Flugfähigkeitsdiagramm beschreibt die luftgetragene Verbreitung von Partikeln einer bestimmten Größe in μm bezogen auf die jeweilige Dichte des Partikelstoffes in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Die meisten der in der industriellen Fertigung nachweisbaren Stoffe weisen Dichten deutlich über $1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ auf. Lediglich Papierpartikel oder Holzspäne sind im Bereich von $0,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bis $0,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ als potentielle Gefährdungen zu identifizieren. Auf Basis der Flugfähigkeit ist die Einrichtung eines entsprechenden Raumkonzepts erforderlich. Auf die in der Abbildung eingezeichneten Raumkonzepte geht die VDA19 detailliert ein. Ziel dieser Raumkonzepte ist es, das Sauberkeitsniveau der Bauteile durch eine Regelung der Umgebung vor negativen Umwelteinflüssen zu schützen. Die weiße Fläche kennzeichnet bspw. den Bereich, in dem aufgrund der kritischen Partikelgröße abhängig von der Dichte ein Reinraumkonzept notwendig ist. [VDA19]

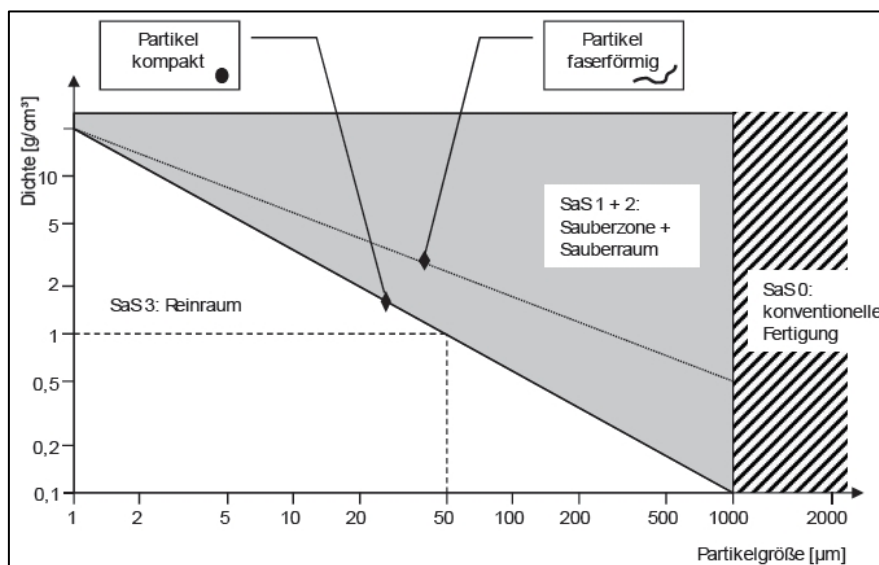


Abbildung 6: Raumkonzept in Abhängigkeit der Partikelgröße [VDA19.2]

Abhängig von den definierten Sauberkeitsgrenzwerten ist zu ermitteln, durch welche Einflussfaktoren welche Art von Partikeln generiert werden können. Mit der Kenntnis potentieller Auswirkungen von Einflussfaktoren können durch den Einsatz und die Konfiguration entsprechen-

der Ressourcen Maßnahmen, wie bspw. der Einsatz eines angepassten Raumkonzeptes, bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden.

2.6 Management des Qualitätsmerkmals Technische Sauberkeit

Das Qualitätsmanagement als Disziplin der Unternehmensführung hat die Aufgabe alle Aktivitäten hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen des Kunden zu planen, zu lenken, zu prüfen und zu verbessern. [Sch08]. Das Qualitätsmanagement beinhaltet somit die präventive Fehlervermeidung und die Planung der Maßnahmen zur Fehlerentdeckung und -behebung [Hum13] [Wei08]. Die Notwendigkeit, Qualitätsmerkmale präventiv und prozessübergreifend entlang des Wertstroms zu betrachten, wird in vielen Qualitätsmanagementbüchern hervorgehoben und beschrieben, da die Kosten für Änderungen bzw. Fehlerbehebungen angefangen von der Konstruktion bis zum Kundeneinsatz exponentiell ansteigen [Bru04] [Pfe94] (Abbildung 7).

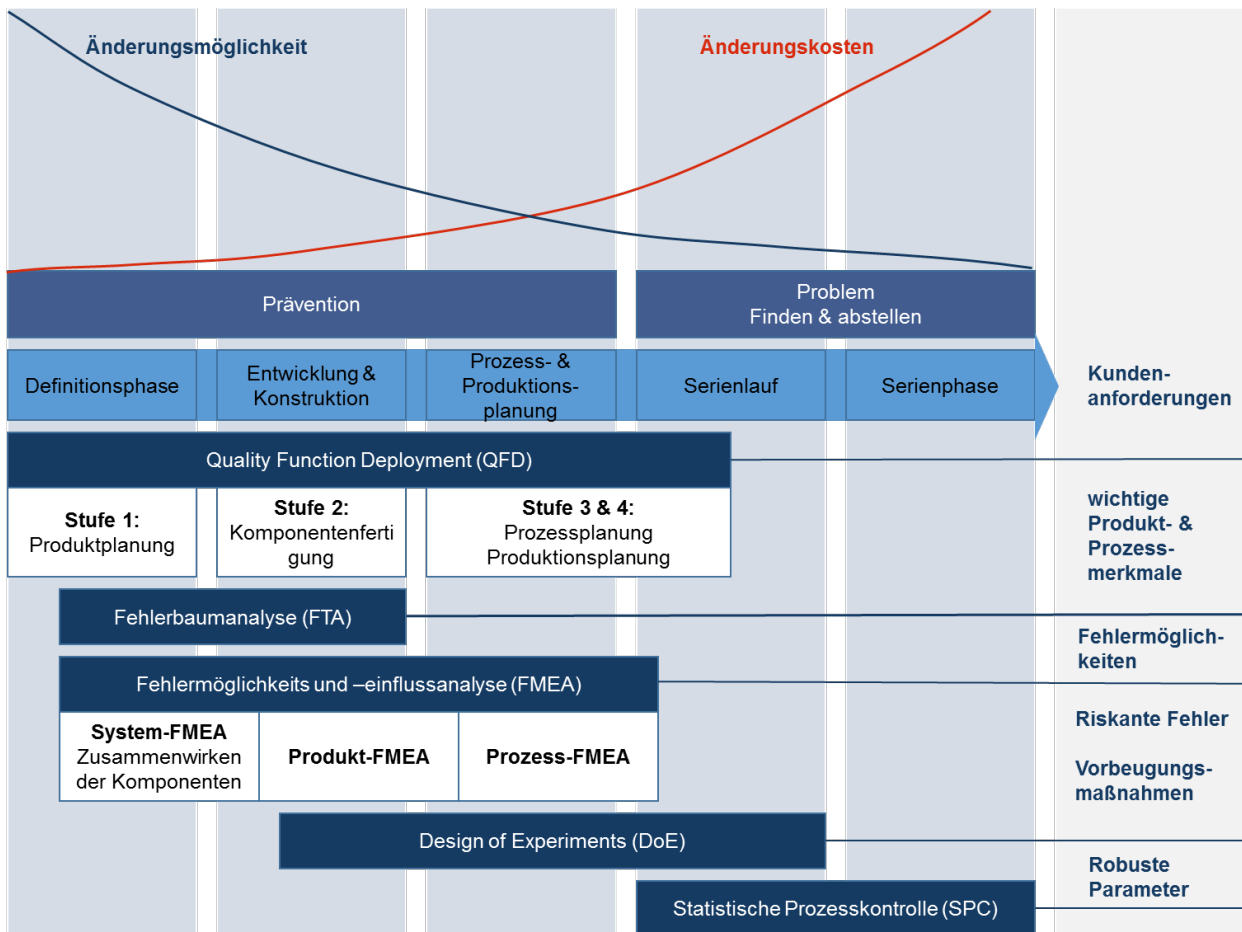


Abbildung 7: Methodenübersicht im Produktentstehungsprozess [Pfe01]

Trotz der Vielzahl bestehender Methoden des präventiven Qualitätsmanagements bestehen derzeit keine Ansätze, um die Methoden des Qualitätsmanagements an die Erfordernisse der Technischen Sauberkeit zu adaptieren. Zudem bestehen im Bereich des Qualitätsmanagements bislang keine expliziten Methoden, mit denen das Qualitätsmerkmal „Technische Sauberkeit“ entlang des gesamten Wertstroms modelliert und systematisch untersucht werden

kann. Auch Berichte über den positiven Einsatz spezieller Methoden in diesem Handlungsfeld liegen bislang nicht vor.

Grundsätzlich bestehen unterschiedliche Sichtweisen über die Notwendigkeit angepasster Methoden des Qualitätsmanagements im Bereich der Technischen Sauberkeit. Einerseits postuliert der Leitfaden Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik [ZVE14] das generell die Partikelvermeidung der Partikelentfernung vorzuziehen ist. Andererseits konzentriert sich ein Großteil der Aktivitäten in Forschung und Praxis auf die Planung der Analyse und Behebung von Verschmutzungen [Bil13]. Hier zeigt sich ein divergierendes Vorgehen vom eingangs vorgestellten Qualitätsmanagementverständnis. Wie die Markt- und Trendanalyse in der industriellen Teilereinigung der Fraunhofer Gesellschaft zeigt, sehen 33 % der Hersteller von Reinigungsanlagen den Aufwand der Vermeidung von Verschmutzungen höher an, als den Aufwand Teile zu reinigen. Gleichzeitig nennen 57 % der Anwender die Optimierung bestehender Anlagen sowie 43 % den Kauf neuer Anlagen als geplante Veränderung der nächsten fünf Jahre. Die Vermeidung von Verschmutzung sehen 28 % der Anwender als Ansatzpunkt in den nächsten 5 Jahren [Bil13].

Dieses Ergebnis zeigt die starke Fokussierung insbesondere der Hersteller auf den Reinigungsprozess selbst. Der Aufwand des Anwenders für die Integration und den Betrieb der Reinigungsanlagen in die Wertströme wird hier jedoch unberücksichtigt gelassen. Insbesondere im Hinblick auf Aspekte des Umweltschutzes und der Energie- und Ressourceneffizienz wird von Seiten der Anwender ein hoher Entwicklungsbedarf gesehen.

Dagegen wird die Vermeidung von Verschmutzungen von den Anwendern auf Platz 11 und bei den Herstellern auf Platz 6 von 12 genannt. Dieses Ergebnis kann einerseits als Trennung der Themen Reinigungstechnik und Vermeidung von Verschmutzungen durch die Anwender interpretiert werden. Die Trennung beider Disziplinen zeigt das Fehlen eines integrierten Sauberkeitskonzeptes und die Trennung der Verantwortungsbereiche. Diese Interpretation wird von dem Umfrageergebnis gestützt, dass die Technische Sauberkeit im Produktentstehungsprozess lediglich von 36 % der Anwender bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt wird. 58 % der Anwender dagegen beziehen dieses Qualitätskriterium erst deutlich später in die Planung mit ein [Bil13].

Andererseits zeigt das Ergebnis, dass die Hersteller die Vermeidung von Verschmutzungen als größere Herausforderung als die Anwender ansehen. Dies kann als Erkennen der Relevanz einer umfassenden Planung der Technischen Sauberkeit für deren Leistungsangebot verstanden werden. Ferner sehen die Anwender die Herausforderungen „Zeiteinsparmaßnahmen“ und die „Optimierung der Materialflussoperation Transport der Teile“ auf Platz 5 bzw. 6 der Umfrage. Dies unterstreicht den Ansatz dieses Forschungsvorhabens die Technische Sauberkeit ausgehend vom Reinigungsprozess auf den gesamten Wertstrom zu erweitern und damit den Aufwand zur Vermeidung und Sicherstellung der Technischen Sauberkeit zu reduzieren. Durch eine wertstrombezogene Betrachtung und Reduzierung des Rückverschmutzungsrisikos und der damit einhergehenden Reduzierung der Reinigungsprozesse können

nicht nur die Durchlaufzeit reduziert sondern auch ein Beitrag zum Umweltschutz und zur Energieeinsparung geleistet werden.

2.6.1 Messung und Analyse von partikulären Verschmutzungen

Die Messung und Analyse partikulärer Verschmutzungen dient dazu, an relevanten Oberflächen des Prüfobjekts vorhandene Partikelverschmutzung, wie sie aus Herstellungsprozess und Umfeld resultiert, möglichst vollständig und zutreffend messtechnisch zu erfassen und den Verschmutzungsquellen zuzuordnen. Die Partikelgröße, die Anzahl der Partikel bezüglich einer definierten Referenzfläche sowie das Partikelmaterial sind die zentralen Analysefaktoren zur Bestimmung der Partikelkontaminierung von Bauteilen (vgl. Kapitel 2.4) Während Bauteile, wie unstrukturierte Wafer oder andere polierte, ebene Oberflächen direkt und ohne vorhergehende Extraktionsprozedur analysiert werden können, kommen bei rauen und komplexen Bauteilen indirekte Verfahren zum Einsatz [Koh08].

- **Vorgehen bei der Analyse**

Durch die Mobilität der Partikel ist es sinnvoll, sowohl einzelne Bauteile als auch ganze Systeme zu analysieren [ZVE14]. Um Verschmutzungen in einer Sauberkeitsanalyse messen, quantifizieren und klassifizieren zu können, werden leistungsfähige Extraktions- und Analyseverfahren benötigt [Gai02]. Aufgrund der Geometrie und der Oberflächenbeschaffenheit ist für die Mehrzahl der Bauteile eine Erfassung und Analyse der Verschmutzungen mit direkten Inspektionsmethoden nicht möglich. Aus diesem Grund wird die technische Sauberkeit von Bauteilen in einem mehrstufigen Verfahren indirekt geprüft. Einen Überblick über die Verfahren zur Bestimmung der Technischen Sauberkeit gibt Abbildung 8 [VDA19] [DIN06].

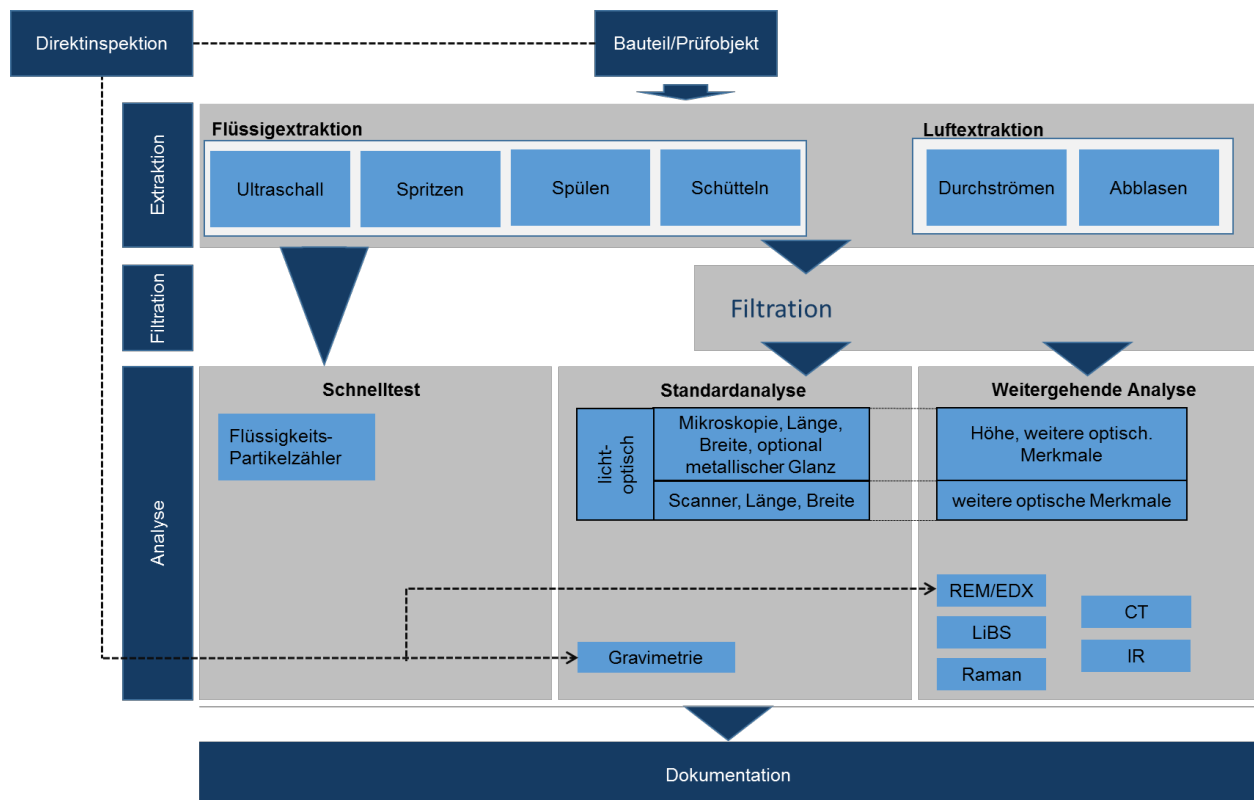


Abbildung 8: Verfahren zur Analyse der Technischen Sauberkeit [i.A.a. Roc14a]

Partikel werden bei indirekten Verfahren zuerst von den relevanten Bauteilbereichen extrahiert, um das Maximum der auf der Bauteiloberfläche befindlichen Partikel zu lösen und anschließend sammeln und analysieren zu können. Die Extraktion kann dabei durch eine Spülflüssigkeit oder durch Reinstluft erfolgen. Allen Extraktionsverfahren gemein ist die damit einhergehende Zerstörung des ursprünglichen Sauberkeitszustands des Bauteils. Folgend werden die Schritte einer Sauberkeitsprüfung in chronologischer Reihenfolge erläutert.

- **Blindwertmessung**

Je strenger die Grenzwerte an die Technische Sauberkeit definiert werden, desto größer ist die Möglichkeit, dass im Rahmen der Prüfung eingebrachte Verschmutzungen das Prüfergebnis verfälschen. Um zuverlässige Messergebnisse bei Extraktionsverfahren gewährleisten zu können, ist die regelmäßige Durchführung von Blindwertmessungen ohne Bauteil erforderlich. Der Blindwert beschreibt die Grundverschmutzung des Extraktionssystems, welche durch die Umgebung, die Prüflüssigkeit oder die Handhabung während der Erprobung eingetragen wird.

Entsprechend der VDA 19 darf der Blindwert des Extraktionssystems 10 % der geforderten bzw. voraussichtlichen Partikelanzahl nicht überschreiten. Hinsichtlich der Partikelgröße wird der maximal zulässige Wert halbiert und in ein entsprechendes Größenintervall eingeordnet. Ist das Sauberkeitsniveau des zu prüfenden Bauteils unbekannt, so darf im Blindwert kein Partikel $\geq 50 \mu\text{m}$ enthalten sein [VDA19].

• Extraktion und Extraktionsqualifizierung

Die Entscheidung für den Einsatz einer der in der VDA19 näher erläuterten Extraktionsprozeduren basiert auf der Qualifizierung dessen Abreinigungswirkung. Bei indirekten Analysemethoden entscheidet das Extraktionsverfahren grundlegend über die richtige Beurteilung der Bauteilsauberkeit. Wie in Abbildung 8 aufgezeigt, lässt sich grundsätzlich nach Art des eingesetzten Extraktionsmediums in Flüssigkeitsextraktion und Luftextraktion unterscheiden. Bei der Luftextraktion wird das Bauteil mit Reinstluft abgeblasen und die Extraktionskammer anschließend mit einer Spülflüssigkeit gereinigt [Roc14b].

Durch wiederholtes Beproben des Bauteils wird im Rahmen der Qualifizierung geprüft, ob die Partikelfracht abnimmt und somit ein geeignetes Verfahren vorliegt [VDA19]. Mit der Ermittlung einer in Abbildung 9 dargestellten Abklingkurve kann die Eignung des Verfahrens selbst, der Extraktionsdauer, der Vorbehandlung und der Menge des eingesetzten Extraktionsmediums überprüft werden.

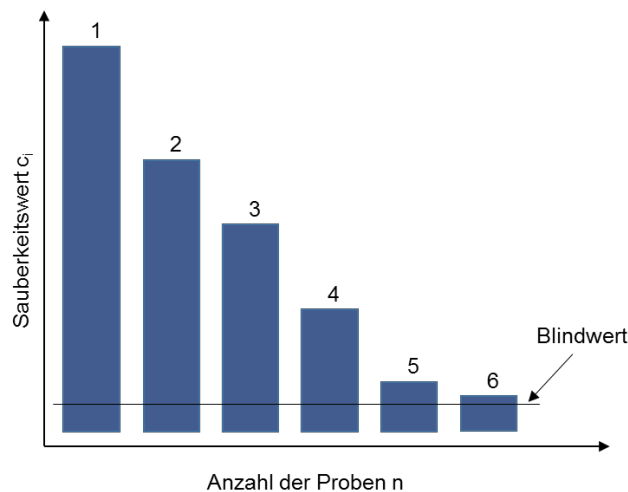


Abbildung 9: Abklingkurve [VDA19]

Das Kriterium zur Festlegung der Eignung eines Extraktionsverfahrens ist das Abklingkriterium [VDA19]

$$c_n \leq 0,1 * \sum_{i=1}^n c_i \quad (n \leq 6)$$

mit

c_n Contamination Level (Partikelgrößenklasse vgl. Tabelle 2) nach n Extraktionszyklen

c_i Contamination Level in Extraktionszyklus i

Ein Extraktionsverfahren gilt als geeignet, wenn nach maximal sechs Extraktionszyklen der ermittelte Messwert maximal 10% der aufsummierten Messwerte erreicht. Ist dies nicht der Fall, kann das Extraktionsmedium die Partikel nicht von der Oberfläche lösen oder der Extraktionsvorgang greift die Bauteiloberfläche an, sodass ständig Partikel gelöst werden und kein Abklingen feststellbar ist.

• **Filtration und Trocknung**

Dem Filter kommen bei der Filtration und der anschließenden Analyse mehrere Aufgaben zu. Im Rahmen der Filtration werden mit Hilfe des eingesetzten Filters die extrahierten Partikel von der Spülflüssigkeit getrennt. Dabei ist die Filterporenweite ein entscheidendes Kriterium bzgl. der Größe der zu detektierenden Partikel. Die Filterporenweite sollte dabei 1/6 – 1/10 der Größe des kleinsten zu messenden Partikels betragen [Roc14b]. Bei der folgenden Analyse dient die Filtermembran zudem als Kontrastfläche und Probenträger. Die Partikelfracht des Prüfobjekts wird bei der Analyse durch Gravimetrie durch den Massenzuwachs eines Analysefilters bestimmt (Differenzwägung). Dabei muss der Filter vor der Analyse getrocknet werden. Die Massendifferenz vor und nach der Trocknung wird als wieder abgegebene Feuchtigkeit, resultierend aus der Aufnahme der Spülflüssigkeit im Filter, interpretiert. Die Trocknungsdauer und -temperatur sind dabei wichtig, um reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen [Dre08].

• **Bauteilanalyseverfahren für partikuläre Verschmutzungen**

Die Untersuchung derzeit verfügbarer Analyseverfahren zeigt ein breites Spektrum von analysierbaren Partikelmerkmalen. Einen Überblick über bestehende Analyseverfahren gibt Tabelle 4. Dabei werden für die direkte Bauteilinspektion, die Schnelltests, die Standard- sowie die Sonderverfahren die Aussagekraft der Messwerte sowie die Verfahrensgrenzen dargestellt.

Tabelle 4: Überblick Analyseverfahren [Val14][Kön14] [Hen14] [VDA19][Gro14] [Kön14]

Verfahren		Ausführung	Messwert	Aussagekraft	Grenzen
	Direkte Bauteilinspektion	<ul style="list-style-type: none"> • Meist Anwendung mikroskopischer Verfahren zur Begutachtung der Bauteiloberfläche • keine Probenahmeinflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach eingesetztem Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Aussagekraft, da Partikel ohne Veränderung der Zahl oder Lage detektiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> • In der Regel nur an begrenzten Bauteilbereichen mit hoher Oberflächengüte möglich.
Schnelltests	Flüssigkeitspartikelzähler	<ul style="list-style-type: none"> • z.B. Extinktionspartikelzähler • Entfall der Herstellung eines Analysefilters 	<ul style="list-style-type: none"> • Partikelgrößenverteilung (Äquivalentdurchmesser) 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Partikeleinzelvermessung erlaubt Rückschlüsse auf das Schädigungspotential der Partikel 	<ul style="list-style-type: none"> • Partikeldichte in der Testflüssigkeit darf nicht zu hoch sein, da sonst die Einzelpartikel nicht getrennt werden können • Prüfflüssigkeit bei der Vermessung darf keinerlei Gasblasen oder Fremdflüssigkeitstropfen enthalten. • Koinzidenz

	Verfahren	Ausführung	Messwert	Aussagekraft	Grenzen
Standardverfahren	Gravimetrie	<ul style="list-style-type: none"> Manuell/ Automatisiert 	<ul style="list-style-type: none"> Gesamtmasse der extrahierten Partikel 	<ul style="list-style-type: none"> Information über das Sauberkeitsniveau ohne Aussage über das Schädigungspotential einzelner Partikel. 	<ul style="list-style-type: none"> klimatische Einflüsse wie Luftfeuchtigkeit
	Licht-optische Mikroskopie und Scanner automatisch partikelzählend	<ul style="list-style-type: none"> Labormikroskop Stereomikroskop manuell/ automatisiert 	<ul style="list-style-type: none"> Partikelgrößenverteilung (Partikellänge) Zuordnung Partikelmateriale über den Glanzgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Die Partikeleinzelvermessung erlaubt Rückschlüsse auf Farbe, Morphologie und Glanz sowie das Schädigungspotential der Partikel 	<ul style="list-style-type: none"> geeignet für geringe Filterbelegung Partikel müssen einzeln und getrennt vorliegen.
	Licht-optische Mikroskopie und Scanner (bildgebend)	<ul style="list-style-type: none"> Manuell/ Automatisiert 	<ul style="list-style-type: none"> Partikelgrößenverteilung (Partikellänge) Glanzgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung der Partikelgrößenverteilung je Klasse „Metallisch“, „Nicht Metallisch“ und „Faser“ 	<ul style="list-style-type: none"> Messfehler durch: <ul style="list-style-type: none"> die im Filter aufgenommene Spülflüssigkeit kann Ebenheit des Filters beeinträchtigen bei Eintrocknung des Filters können kleinere Partikel von größeren auf dem Filter befindlichen Partikel hingezogen werden
Sonderverfahren	Rasterelektronenmikroskopie mit Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)-Elementaranalyse	<ul style="list-style-type: none"> Manuell/ Automatisiert 	<ul style="list-style-type: none"> Partikelgrößenverteilung (Partikellänge) Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> Identifizierung der Elemente Maximaler Informationsgehalt, da aus der Größe und der Materialinformationen auf das tatsächliche Schädigungspotential eines Partikels und seine Herkunft geschlossen werden kann. 	<ul style="list-style-type: none"> geeignet für geringere Filterbelegung Partikel müssen einzeln und getrennt vorliegen schwierige Detektion und Unterscheidung organischer Partikel mittels EDX lange Messzeiten organische Partikel nicht messbar
	Laser Induced Breakdown (Plasma) Spectroscopy (LIPS/LIPS)	<ul style="list-style-type: none"> Automatisch 	<ul style="list-style-type: none"> Abgleich Partikelspektrum zu Referenzspektrum 	<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung der Elemente 	<ul style="list-style-type: none"> Partikelgröße > 20 µm wie Mikroskop System optimiert für Metalle, keine Nichtmetalle Elemente maskieren Legierungsbestandteile Mindestunterschied abhängig vom Legierungssystem

	Verfahren	Ausführung	Messwert	Aussagekraft	Grenzen
Sonderverfahren	(Mikro-) Raman	• Automatisch	• Abgleich Partikelspektrum zu Referenzspektrum zur Typisierung von Organik und Kunststoffen	• Übereinstimmung chemische Struktur des Partikels mit in Datenbank abgelegter Werkstoffstruktur, Rückschlüsse auf Partikelquelle möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Partikelgröße > 0,5 µm • Nicht geeignet für Metalle und schwarzen Kunststoff, da schwarze Partikel absorbieren • Thermische Zerstörung der Probe möglich • Fluoreszenzsignal überdeckt Raman • Filteruntergrund liefert zusätzliches Spektrum
	Fourier-Transformation-Infrarot (FTIR)-Spektroskopie	• Automatisch	• Abgleich Partikelspektrum zu Referenzspektrum	• Identifikation der chemischen Struktur	• Partikelgröße > 50 µm
	Computer Tomographie (CT)	• Automatisch	• Länge, Breite und Dicke der Partikel	• Volumen, für kritische Komponenten	• Lange Messzeiten

Die Übersicht über die bestehenden Partikelanalyseverfahren in Tabelle 4 macht die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Technologien hinsichtlich Partikelvermessung und -bestimmung deutlich. Derzeit sind die Verfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Partikel Sonderverfahren, welche mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sind. Dennoch bieten diese Verfahren die Möglichkeit, einen umfassenden Katalog von Partikelquellen zu erstellen und diesen partikulären Verschmutzungen zuzuordnen. Der Aufbau dieser Wissensbasis ist die Grundlage für eine prospektive Risikobewertung und eine tiefgehende Prozessoptimierung hinsichtlich der Vermeidung von Verschmutzungsrisiken.

Mit der Analyse der Bauteilsauberkeit ist eine Aussage über das Sauberkeitsniveau des Bauteils möglich. Neben der Messung der Bauteilsauberkeit, kann auch die Sauberkeit der Umgebungsluft messtechnisch erfasst werden.

- **Analyseverfahren für Umgebungssauberkeit**

Die Messung der Umgebungssauberkeit ist insbesondere für die Bewertung des Rückverschmutzungsrisikos bei ungeschützten Bauteilen sowie für die Identifikation kritischer Partikelquellen interessant. In nicht reglementierten Bereichen unterliegt die Umgebungs- und Luft-

sauberkeit hohen Schwankungen, sodass hier eine regelmäßige Messung zur Identifikation und Analyse von Partikelquellen und der Ableitung entsprechender Maßnahmen erforderlich ist [VDA19.2]. Zudem können Fertigungsbereiche in entsprechende Sauberkeitszonen eingeteilt und die Einhaltung definierter Grenzwerte überprüft werden. In der VDA 19.2 sind dazu entsprechende Mess- und Analyseverfahren beschrieben. Das am weitesten verbreitete Messverfahren zur Analyse der partikulären Kontamination im Größenbereich 25 µm bis >> 1mm in der Umgebungsluft ist die Verwendung von sog. Partikelfallen. Dabei werden horizontale Probenflächen einer festgelegten Größe für einen definierten Zeitraum ausgelegt und anschließend die sedimentierten Partikel mikroskopisch gezählt und vermessen. Die Partikelfalle besteht vorzugsweise aus einem runden Klebepad und einem Kunststoffträgerrahmen [VDA19.2]. Durch die Auswertung des Partikelniederschlags auf einer definierten Sedimentationsfläche ist eine Korrelation zur tatsächlichen Belastung der Oberflächen (z.B. auch offen gelagerte Bauteile) nach VDA 19.2 zulässig. Die Auswertung der Partikeloberfläche erfolgt anhand lichtmikroskopischer Verfahren ebenfalls nach VDA 19.2. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse wird eine Normierung der Fläche auf 1000 cm² und eine Expositionszeit von einer Stunde vorgegeben. Um dem wachsenden Schädigungspotential Rechnung zu tragen werden größere Partikel entsprechend höher gewichtet. Durch die Summation der normierten, gewichteten Partikel wird die Sedimentationszahl (Illig-Wert) als Bezugsgröße berechnet nach

$$\sum_{d=50}^{1000} n_d (d/50)^2$$

n= Anzahl der Partikel

d= Größenklasse gem. ISO 16232

Mit Hilfe des Illig-Wertes kann somit eine Vielzahl von Partikeln unterschiedlicher Größenklassen auf eine Maßzahl reduziert werden. Dies bringt Vorteile bei der Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen mit sich, da anhand des Illig-Wertes Messwerte von unterschiedlichen Orten und abweichender Probenentnahmedauer gegenübergestellt werden können. Die Berechnung des Illig-Wertes ist sowohl für die Sauberheitskontrolle des jeweiligen Bereichs als auch für den Vergleich von Sauberkeitszuständen gleicher Bauteile anwendbar. Zur Definition von Grenzwerten für Bauteile ist diese Maßzahl dagegen nicht geeignet. [VDA19.2]

Die Berechnung des Illig-Werts erfolgt beispielhaft wie nachfolgend dargestellt [VDA19.2]:

Tabelle 5: Berechnung Illig-Wert

Partikelgröße [μm] d	Anzahl Partikel n_d	Gewichtungsfaktor $(d/50)^2$	Gewichtete Partikelzahl
$5 \leq x \leq 15$	1903	0	0
$15 \leq x \leq 25$	1720	0	0
$25 \leq x \leq 50$	1540	0	0
$50 \leq x \leq 100$	289	1	289
$100 \leq x \leq 150$	46	4	184
$150 \leq x \leq 200$	14	9	126
$200 \leq x \leq 400$	4	16	64
$400 \leq x \leq 600$	2	64	128
$600 \leq x \leq 1000$	0	144	0
$1000 \leq x$	1	400	400
		Summe:	1191
Berechnung Normierungsfaktor			
Probenentnahmedauer:	1 Woche	=	168h
Messfläche:	Auswertedurchmesser am Mikroskop $r = 44\text{mm}$		$15,2 \text{ cm}^2$
Normierungsfaktor:	$\frac{1 \text{ h}}{\text{Probenentnahmedauer [h]}} * \frac{1000 \text{ cm}^2}{\text{Messfläche [cm}^2\text{]}}$		0,39
Berechnung Illig-Wert aus $\sum(\text{Gewichtete Partikelzahl}) \times \text{Normierungsfaktor}$			
		1191 * 0,39	464,49
		Illig-Wert [1/1000cm²h]	464

Zur sauberkeitsgerechten Analyse des Wertstroms können durch das Auftragen der gemessenen Illig-Werte im Fabriklayout sauberkritische Zonen bzw. Materialflussoperationen identifiziert und verglichen werden [Ill13]. Die Probenauswertung kann gemäß VDA 19.2 in gleicher Weise für spezielle Partikelgruppen, wie bspw. metallische Partikel, erfolgen. Durch die Kenntnis der für den jeweiligen Prozess kritischen Verschmutzungen können anhand des Illig-Werts schnell Aussagen über Rückverschmutzungsrisiken entlang des Wertstroms getroffen werden.

2.6.2 Forschungsansätze zur Erzeugung von Technischer Sauberkeit

Unabhängig von der Quelle ist die Anlagerung von Verschmutzungen an der Bauteiloberfläche immer mit der Freisetzung von Energie verbunden [Mau12]. Dementsprechend muss für das Entfernen bzw. das Reinigen mechanische, thermische oder chemische Energie über einen definierten Zeitraum auf das Bauteil einwirken. Sinner beschreibt den Reinigungsprozess als ein von den Einflussgrößen Prozesszeit, chemische Zusammensetzung der Medien sowie dessen Konzentration, die eingesetzten mechanischen Wirkprinzipien sowie der Temperatur beeinflusstes System (Abbildung 10). Unter Einbeziehung der Ressourceneigenschaften des

Reinigungsguts (Reinigungsanlage) (Kapitel 4.1) und der Verschmutzung (Kapitel 2.1) kann nach Wildbrett der sinnersche Kreis auf sechs Einflussfaktoren erweitert werden [Wil06.]

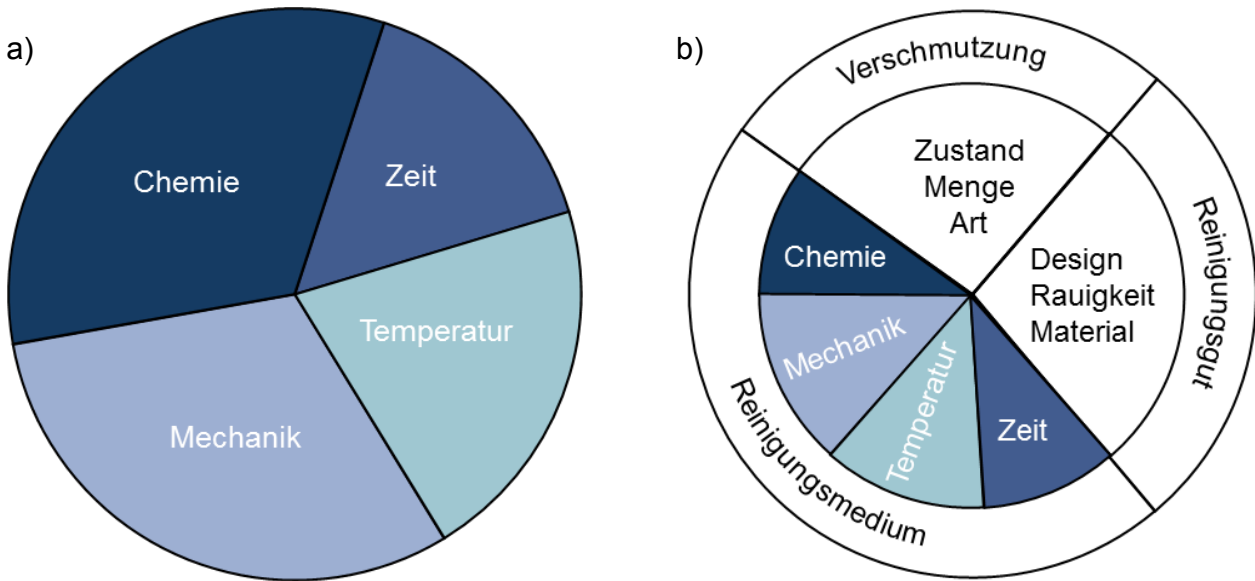


Abbildung 10: a) Sinnerscher Kreis [Sin60] und b) Erweiterter Sinnerscher Kreis [Wil06]

Die im sinnerschen Kreis beschriebenen Einflussfaktoren stehen in Wechselwirkung zueinander. Laut Bleisch et al. ist das Zusammenwirken der sechs Einflussfaktoren während des Reinigungsprozesses weiterhin Gegenstand der Forschung [Ble11]. Es wird davon ausgegangen, dass sich Wirkungsanteile verschieben bzw. Einflussgrößen vollständig wegfallen können.

Richard [Ric09] geht in seiner Arbeit tiefer auf die im sinnerschen Kreis beschriebenen Einflussfaktoren auf die Bauteilreinigung in der industriellen Fertigung ein. Ein wesentliches Ergebnis seiner Untersuchungen ist, dass die Geometrie des Bauteils einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Reinigungszeit darstellt.

Die Untersuchungen von Richard und Wildbrett zeigen, dass die Betrachtung der Einflussfaktoren auf den Reinigungsprozess und bei der Auswahl einer geeigneten Anlage durch die Betrachtung des Zusammenwirkens aus Produkt-, Prozess- und Ressourceneigenschaften zu erweitern ist.

3 Systemische Betrachtung von sauberkeitsgerechten Materialflüssen

Das Ziel der Produktion ist die zeitgerechte und kostengünstige Herstellung von Qualität [Thi08]. Das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit ist demnach ein Aspekt, den es im Rahmen der Produktionsplanung zu berücksichtigen gilt. Die Produktion als der Erzeuger von Qualität ist dabei durch wechselseitige Einflüsse bestimmt, welche ein komplexes Zusammenwirken von Elementen und Rahmenbedingungen darstellen [Wie11]. Diese Einflüsse lassen sich allgemein in die Klassen Produkt, Prozess und Ressource subsumieren [Jon00]. Um die Elemente und Rahmenbedingungen entsprechend berücksichtigen zu können, bildet die Wertstrombetrachtung als Modellierungsansatz unter Zugrundelegung der Systemtheorie die Produktion als physisches System ab. Ziel der wertstrombasierten Betrachtung von Produktionssystemen ist somit eine systemische Betrachtung, die mit einer produktbezogenen Sicht einhergeht.

3.1 Systemtheoretischer Ansatz

Im Bereich der Systemtheorie kann zwischen dem funktionalen, dem strukturalen und dem hierarchischen Systemkonzept unterschieden werden [Rop12].

- **Funktionaler Ansatz**

Im funktionalen Ansatz wird das System als „Black Box“ betrachtet, welche auf Inputfaktoren aus der Umwelt durch die Veränderung seiner äußeren Eigenschaften und Verhaltensweisen reagiert. Das System kann somit über die Input und Outputfaktoren sowie die Merkmale, die die Verfassung des Systems aufweisen, beschrieben werden [Rop12]. Übertragen auf die Zielstellung des Forschungsvorhabens kann das System Materialflussoperation anhand seiner Inputfaktoren, wie bspw. dem Sauberkeitszustand des Bauteils vor der Operation, den verwendeten technischen Mitteln und den Einflussfaktoren aus der Umwelt und dem resultierenden Sauberkeitszustand des Bauteils nach der Operation beschrieben werden (Abbildung 11).

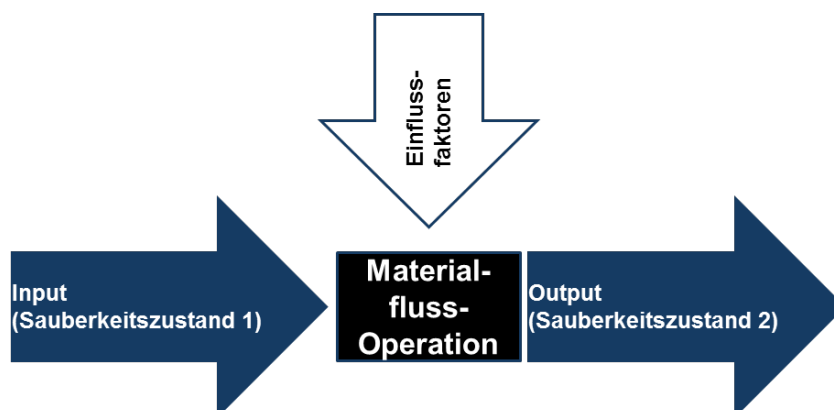


Abbildung 11: Black Box Materialflussoperation

- **Hierarchischer Ansatz**

Der hierarchische Systemansatz beschreibt den Umstand, dass Systemelemente selbst als Subsysteme beschrieben werden können. Die Zerlegung eines Systems in Sub-Systeme wird auch als Dekomposition bezeichnet. Wertströme als modellhafte Abbildung des Produktionssystems lassen sich auf unterschiedlichen Dekompositionsebenen betrachten (Abbildung 12). Dabei kann ein Prozess auf der Wertstromebene wiederum als Sub-Wertstrom verstanden und modelliert werden.

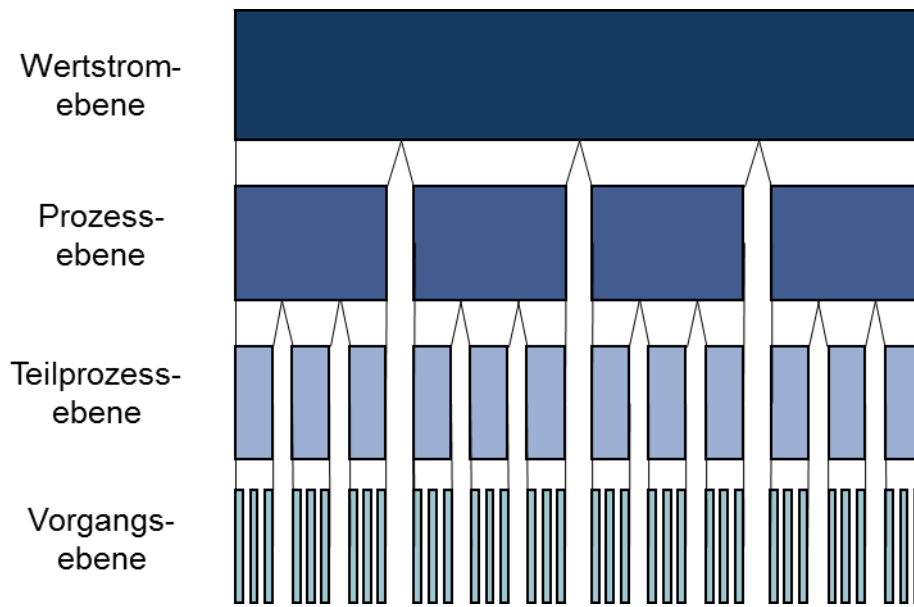


Abbildung 12: Gliederung der Dekompositionsebenen des Wertstroms [Deu14]

- **Strukturaler Ansatz**

Das strukturelle Konzept betrachtet ein System als eine Menge miteinander in Wechselwirkung stehender Elemente. Der strukturelle Ansatz fokussiert zum einen die Mannigfaltigkeit möglicher wechselseitiger Beziehungen der Systemelemente. Zum anderen untersucht er die Beschaffenheit der Elemente selbst. Der strukturelle Ansatz geht davon aus, dass Elemente nicht isoliert sondern in Interdependenz mit anderen Systemelementen zu sehen sind [Rop12]. Weiterhin stehen unter Zugrundelegung des strukturellen Ansatzes unterschiedliche Prozesse auf der Dekompositionsebene des Wertstroms in direktem Zusammenhang. Dieser Zusammenhang kann als Kunden-Lieferanten-Beziehung beschrieben werden. Das heißt, der Kundenprozess stellt Anforderungen an den Output respektive den Sauberkeitszustand des Bauteils aus den vorhergehenden Prozessen.

In einem Wertstrom sind die Elemente, welche direkt mit der Produkterstellung verbunden sind, die Produktionsprozesse, der Informations- und Materialfluss zu nennen [Erl07]. Für das Projektziel sind jedoch lediglich die Produktions- und Materialflussprozesse relevant, wobei bei diesen in „sauberkeitsvermindernd“, „sauberkeitserhöhend“ und „sauberkeitserhaltend“ unterschieden werden kann.

Abbildung 13 visualisiert den strukturalen Ansatz der Systemtheorie und überträgt diesen auf die Technische Sauberkeit. Anhand der Wertstromsymbolik können einzelne Fertigungs- und Materialflussprozesse modelliert werden. Wie einleitend beschrieben werden die Produktion und die dabei erzeugte Qualität von einer Vielzahl von Einflussfaktoren determiniert. Die Abbildung zeigt die Veränderung des Qualitätsmerkmals Technische Sauberkeit anhand der Veränderung der Menge unterschiedlicher Arten von Verschmutzung auf der Bauteiloberfläche entlang des Wertstroms. Da das Produkt innerhalb der Prozesse unter der Verwendung von Ressourcen transformiert wird und damit seine Gestalt und Eigenschaften verändert, lässt dies die Hypothese zu, dass jeder Prozess einen Einfluss auf die Technische Sauberkeit nehmen kann. Welche Verunreinigungen durch welchen Prozess und in welcher Menge hervorgerufen oder gemindert werden gilt es entsprechend zu untersuchen.

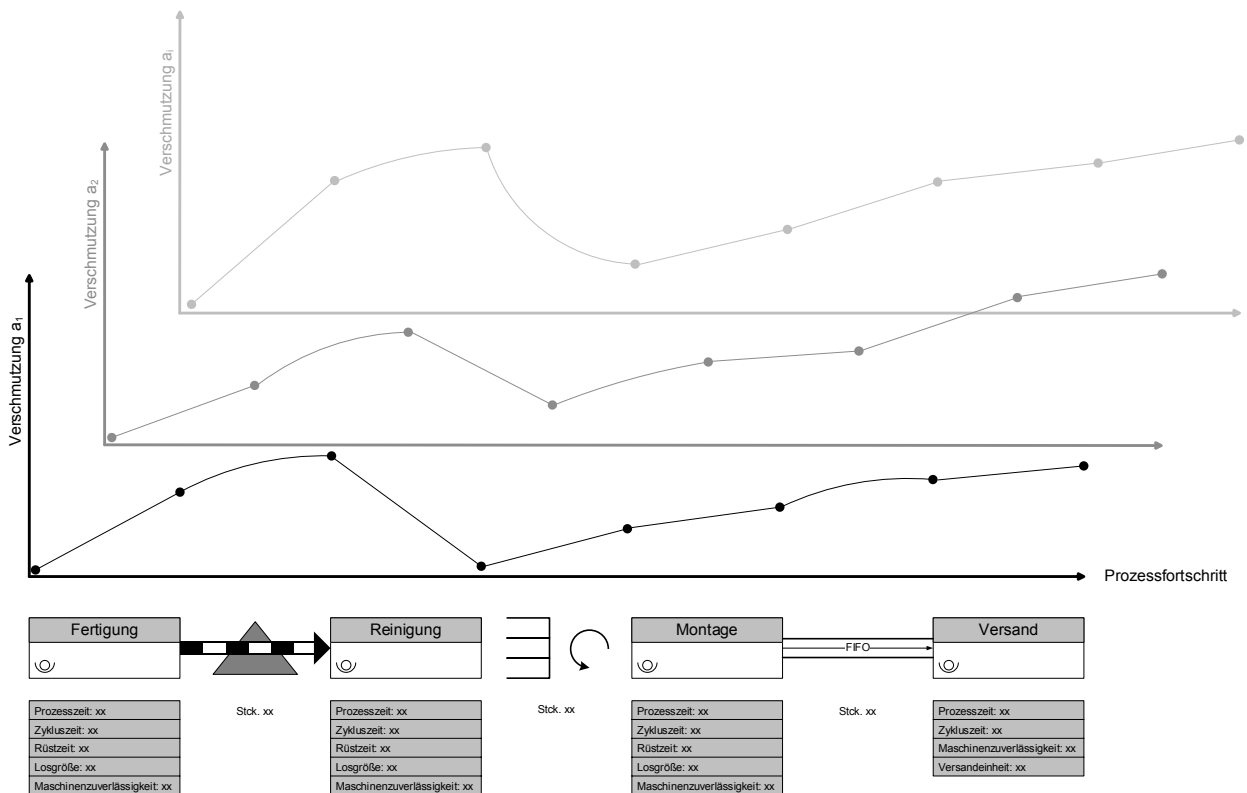


Abbildung 13: Veränderung des Sauberkeitszustandes entlang des Wertstroms

Die drei zuvor erläuterten Systemkonzepte lassen sich zur Modellierung von sauberkeitsgerechten Materialflüssen verbinden. Dies erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens durch die Analyse des Sauberkeitsverhaltens von Probebauteilen in Materialflussoperationen (Kapitel 6) und der anschließenden Betrachtung der Einflussgrößen auf unterschiedlichen Dekompositionsebenen.

3.2 Modellierung und Notation

Mit der Modellierung und Planung eines sauberkeitsgerechten Wertstroms sollte die Definition von Anforderungen und Grenzwerten an die Technische Sauberkeit (Kapitel 2.4) einhergehen. Sauberkeitsgrenzwerte sind dabei nicht ausschließlich vom Endkunden, sondern aufgrund des

potentiell negativen Einflusses des Sauberkeitszustands zudem zwischen den Prozessen zu definieren.

Um bereits in der Planungsphase sauberkeitskritische Prozesse identifizieren zu können, ist neben der Kenntnis der Anforderungen an die Inputfaktoren auch die Kenntnis des potentiellen Sauberkeitszustandes nach dem Prozess erforderlich. Dieser wird von vielfältigen Einflussgrößen und Wechselbeziehungen determiniert. Diese lassen sich grundsätzlich in die Klassen Prozess, Produkt und Ressource eingliedern (Abbildung 14).

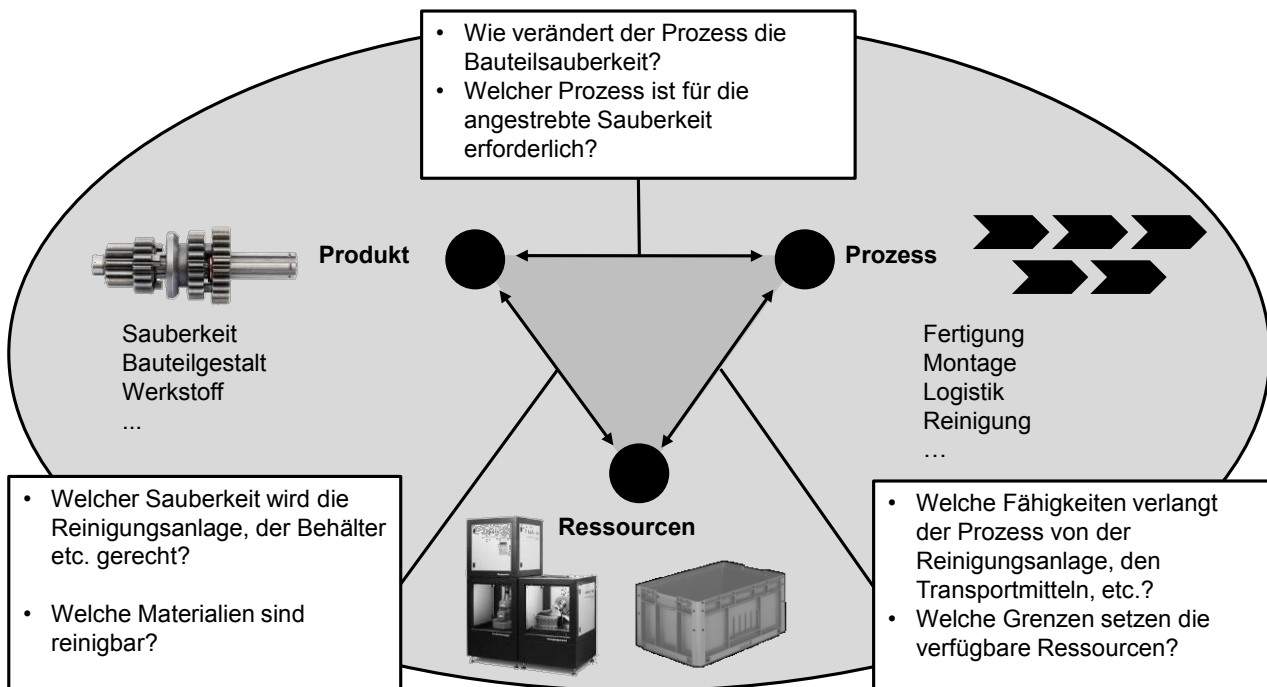


Abbildung 14: Wechselwirkungen im Wertstrom [Kre14]

Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Ressourceneigenschaften, welche einen Einfluss auf die Bauteilsauberkeit besitzen. Produktbezogene Einflussgrößen beziehen sich auf die in der Konstruktion festgelegten Eigenschaften und Qualitätskriterien. Der Prozess beschreibt wie das Produkt transformiert wird und welche Parameter dabei eingestellt werden. Die Ressource beschreibt letztendlich welche physischen Mittel (Maschine, Personal, Gebäude, Behälter etc.) für die Umsetzung der Transformation am Produkt Anwendung finden.

Die dargestellten Interdependenzen zwischen den Klassen zeigen, dass die Auswirkung einer Einflussgröße nicht aus einer singulären Betrachtung einer Klasse abgeleitet werden kann. Für die Modellierung und Analyse sauberkeitsgerechter Wertströme sind damit nach der Identifikation und Ausprägung einzelner Einflussgrößen die Wechselwirkungen untereinander zu untersuchen. Die potentiell negative Auswirkung einer Einflussgröße auf die technische Sauberkeit kann dabei grundsätzlich durch andere Größen kompensiert werden. So kann bspw.

das Rückverschmutzungsrisiko aufgrund einer ungünstigen Bauteilgeometrie durch eine entsprechend gestaltete Verpackung innerhalb einer Transportoperation minimiert werden.

Zusammenfassend lässt sich jeder Prozess bzw. jede Materialflussoperation im Wertstrom hinsichtlich der Technischen Sauberkeit durch die Sauberkeitsanforderung, den produkt-, prozess- und ressourceninduzierten Einflussgrößen sowie dem Sauberkeitszustand nach dem Prozess modellieren (Abbildung 15). Dieses Modell bildet die Grundlage für die weiterführenden Ausführungen in Kapitel 5.

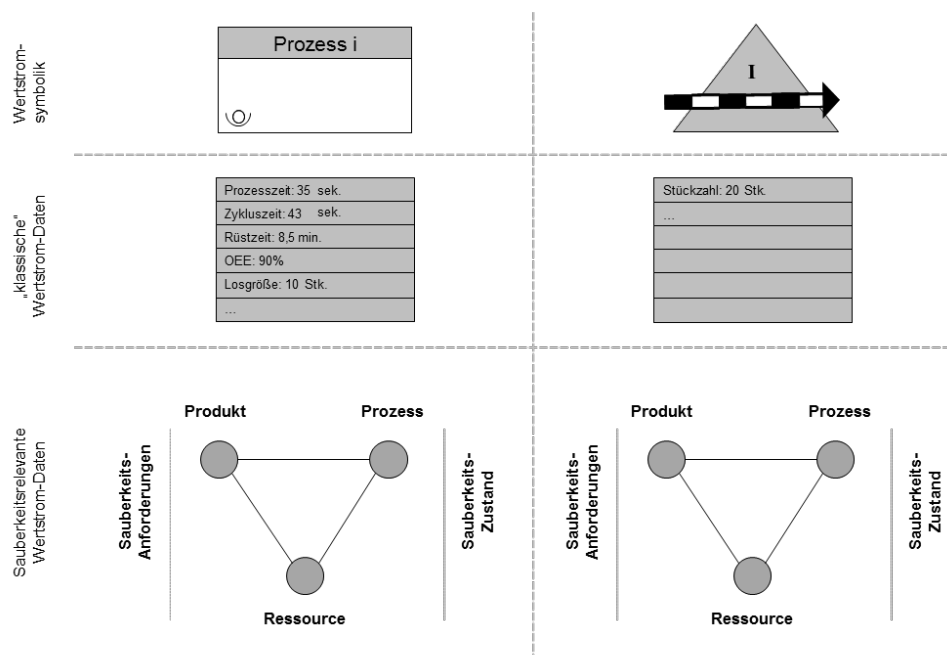


Abbildung 15: Erweiterung des klassischen Wertstromdesigns um sauberkeitsrelevante Einflussgrößen

Um einen Wertstrom und dessen inhärente Materialflüsse sauberkeitsgerecht analysieren und gestalten zu können, ist es dazu erforderlich, die klassischen Wertstromdaten, welche prozessbezogene Einflussgrößen darstellen, um die Ressourcendaten sowie die sich entlang des Wertstroms veränderten Produktdaten zu erweitern. Die Ermittlung der sauberkeitskritischen Prozesse erfolgt durch einen Abgleich der erforderlichen Sauberkeitsgrenzwerte je Prozess mit dem erzeugten Sauberkeitsniveau der vorhergehenden Prozesse. Der Sauberkeitszustand kann dabei durch die in Kapitel 2.6.1 dargestellten Verfahren ermittelt werden. Die systematische Lokalisierung sauberkeitskritischer Prozesse in bestehenden Wertströmen bietet die Möglichkeit, gezielt auf Einflussfaktoren, welche zur Verschmutzung führen, einzuwirken und zu optimieren. Erst wenn keine Optimierung möglich ist, gilt es, das Bauteil bedarfsgerecht zu reinigen. Zudem kann mit Hilfe dieses Vorgehens der Analyse- und Modellierungsaufwand auf relevante Fertigungsbereiche beschränkt werden.

Eine präventive Vorgehensweise erfordert bereits in der Planungsphase Wertströme unter dem Gesichtspunkt der technischen Sauberkeit zu modellieren und zu analysieren. Um bereits in den frühen Phasen der Produktionsplanung sauberkeitskritische Prozesse zu identifizieren, wird sowohl die Kenntnis über die Grenzwerte auf Prozessebene, als auch über das potentiell-

le Sauberkeitsniveau, welches durch jeden Prozess erzeugt wird, benötigt. Zur Vorhersage des Anstiegs der Verschmutzungsmenge bedarf es einer Betrachtung der Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken auf den Sauberkeitszustand eines Prozesses, wie es in Kapitel 5 dargestellt wird.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass sich die Gestalt des Bauteils entlang des Wertstroms verändert und dass unterschiedliche Einflüsse abhängig von der Art und Ausführung von Prozess und Ressource auf das Bauteil wirken. Darüber hinaus ist die Zeit ein Faktor, welcher das Einflussgewicht der Größen determinieren kann. Derzeit besteht keine gesicherte Datengrundlage zur prospektiven Ermittlung der Veränderung des Sauberkeitsniveaus. Nachfolgend sollen daher durch eine weiterführende Untersuchung der Einflussfaktorenklassen Produkt, Prozess und Ressource mögliche singuläre Auswirkungen bestimmt und anhand von Experimenten das Zusammenwirken der Einflussfaktoren untersucht werden.

4 Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit in Materialflussoperationen

Um Veränderungen der Verschmutzungsmenge zu beherrschen und Rückverschmutzungen zu vermeiden, ist die Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Sauberkeit eines Bauteils entlang des Wertstroms erforderlich. Dabei lassen sich die vielfältigen Einflussfaktoren entsprechend dem vorgestellten Zusammenwirken von Prozess, Produkt und Ressource gliedern. Die systematische Identifizierung und Analyse der Einflussfaktoren bilden die Basis für eine weiterführende wissenschaftliche Analyse und Risikobewertung der Rückverschmutzung entlang des Wertstroms und ist die Grundlage für eine gezielte Beeinflussung der Technischen Sauberkeit (Abbildung 16).

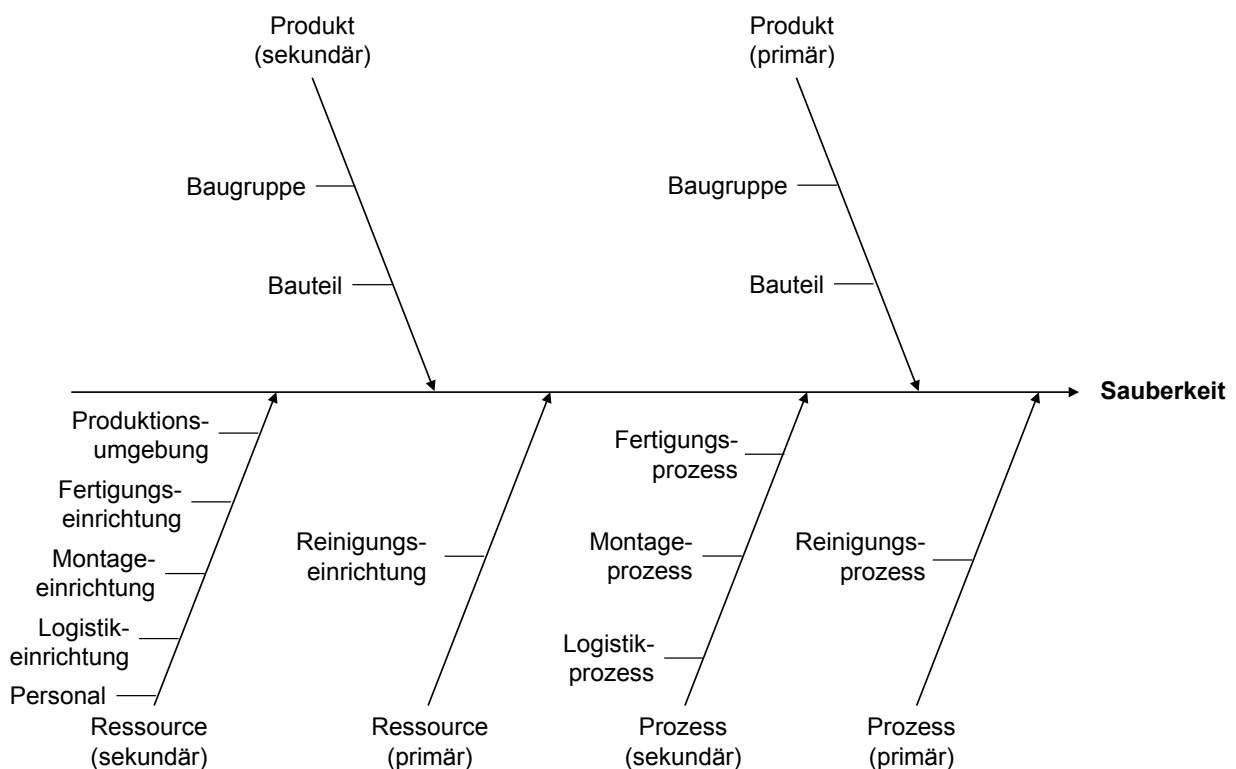


Abbildung 16: Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit

Neben der Einteilung in Klassen, kann ferner zwischen primären und sekundären Einflussgrößen auf den Sauberkeitszustand unterschieden werden. Die primären Einflussgrößen beziehen sich auf die direkte Erzeugung und Beeinflussung des Sauberkeitszustandes des Bauteils. Diese Größen charakterisieren insbesondere die Reinigung, da hier Sauberkeitszustände gezielt verändert werden können. Primäre Einflussfaktoren sind entsprechend dem erweiterten sinnlichen Kreis nach Wildbrett (Abbildung 10), die durch das Produkt erzeugten Verschmutzungen und deren Mengenverteilung sowie die aus der Auslegung der Reinigungsanlage und des Reinigungsprozesses resultierenden Größen.

Sekundäre Einflussfaktoren hingegen beschreiben die sich indirekt auf die Technische Sauberkeit auswirkenden Faktoren. Sie beeinflussen das Sauberkeitsniveau bei den zahlreichen

Transformations- und Materialflussprozessen in Abhängigkeit der dort eingesetzten Ressourcen.

Zur Bewertung des Risikos, dass ein Bauteil nach der Erzeugung eines bestimmten Sauberkeitszustandes durch Partikel verschmutzt wird, werden nachfolgend sekundäre Einflussfaktoren untersucht. Die aus den Reinigungsprozessen resultierenden primären Einflussgrößen sind nicht Betrachtungsgegenstand dieser Ausarbeitung, da der Fokus auf Materialflussoperationen liegt. Die Einflussgrößen werden entsprechend dem vorgestellten Modell der Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess, Ressource zunächst singular betrachtet und anschließend in eine sauberkeitsgerechte Risikobewertung überführt. Die nachfolgend dargestellten Einflussfaktoren erheben dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Aufgrund der Vielzahl und Mannigfaltigkeit der Wechselwirkungen zwischen Produkteigenschaften, Transformationsprozessen, Logistikprozessen und den technischen Mitteln ist es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht möglich, alle wechselseitige Effekte zu erfassen sowie deren Wirkung zu untersuchen und quantitativ zu beschreiben.

Die Erläuterungen in diesem Kapitel geben einen Überblick über bekannte Einflussfaktoren auf die Produktion und werden auf ihre Übertragbarkeit hinsichtlich des Einflusses auf die Technische Sauberkeit untersucht. Die Betrachtung der Dekompositionsebene (vgl. Kapitel 3.1) hilft bei der Einordnung möglicher globaler und lokaler Wirkung der identifizierten Einflussgrößen.

4.1 Produktbezogene Einflussgrößen

In der Konstruktionsphase werden die wesentlichen Eigenschaften des Bauteils sowie dessen Funktion im Verbau festgelegt [Bop97]. Dementsprechend werden 70 - 80 % der Kosten für ein Bauteil in dieser Phase definiert, da sich folgende Prozesse an den in der Konstruktionsphase festgelegten Qualitätsanforderungen ausrichten [Lot12] [Bec92]. Ähnlich der Festlegung von Toleranzen beeinflusst der Konstrukteur auch im Bereich der Technischen Sauberkeit ganz wesentlich die hiermit zusammenhängenden Kosten und legt die Grundlage für die Minimierung des Reinigungsaufwandes in der Produktion [Ric09].

In der Vergangenheit sind eine Vielzahl von Konstruktionsansätzen entwickelt worden, welche sich unter dem Begriff Design for X (DFX) subsumieren lassen [Hua96]. Alle diese Ansätze zielen auf eine möglichst optimale Konstruktion des Bauteils hinsichtlich bestimmter Gesichtspunkte ab. Aufgrund der Verwobenheit der Bauteileigenschaften und -funktionen mit der Gestaltung der Prozesse und technischen Mittel des Materialflusses lassen sich aufbauend auf den bestehenden Ansätzen wie bspw. reinigungsgerechte Konstruktion [Ric09], hygienegeeichte Gestaltung [Eur04] oder strömungsgerechte Konstruktion [Küm07] Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit ableiten. Hierbei spielen Einflussgrößen hinsichtlich Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit eine entscheidende Rolle.

Ferner sind nach der VDA 19.2 bei der Materialauswahl die Eigenschaften Abriebfestigkeit, Oberflächenrauheit/ Porosität, chemische Beständigkeit gegenüber Prozessfluiden und Reini-

gungsmitteln, die Leitfähigkeit bzw. Elektrostatik und der Magnetismus zu berücksichtigen, um eine Ansammlung und Abgabe von Partikeln zu minimieren [VDA19.2].

Die identifizierten Einflussfaktoren lassen sich in die Gestaltungsfelder Geometrie, Oberflächenbeschaffenheit und Werkstoffeigenschaften gliedern. Um eine anschließende Bewertung des Rückverschmutzungsrisikos durch Materialflussoperationen treffen zu können, werden folgend in der Literatur beschriebene Wirkbeziehungen vorgestellt.

4.1.1 Gestaltungsfeld Geometrie

Die Geometrie des Bauteils hat einen erheblichen Einfluss auf das Umströmungsverhalten partikelkontaminierter Luft sowie den Abfluss der Partikel von der Bauteiloberfläche. Durch die Veränderung der Bauteilgeometrie durch die Transformationsprozesse wird die Robustheit des Bauteils gegenüber Verschmutzungen entlang des Wertstroms verändert. Hinsichtlich des Verschmutzungsrisikos in Materialflussoperationen sind produktspezifisch folgende Einflussfaktoren zu nennen:

- **Oberflächengeometrie**

Da sich in Poren, eingebrachten Vertiefungen oder Bohrungen Partikel festsetzen können, bergen geschlossene, ebene Oberflächen ein geringeres Rückverschmutzungsrisiko [Jel99].

- **Bohrungen**

Sacklochbohrungen, insbesondere auf der in der Fertigung definierten Bauteiloberseite, wirken im Vergleich zu Durchgangsbohrungen als Partikelsenken. In Sackbohrungen, engen Spalten, Nuten oder Hinterschneidungen kommt es zur Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit partikelkontaminierter Luft und dadurch zur Ablagerung von Partikeln [Sch10b].

Somit senken Durchgangsbohrungen das Risiko der Erhöhung der Partikelfracht auf dem Bauteil gegenüber Sackbohrungen. Vor allem beim Tiefbohren haben hinterlassene Späne, Partikel oder Grate einen großen Einfluss auf die Funktion des Bauteils, da die hierbei erzeugten Durchmesser bezogen auf die Bohrtiefe zunehmend kleiner werden. Heisel, Schaal und Sabou haben dazu untersucht, welchen Einfluss die Bohrparameter auf die Spanbildung und Abfuhr haben. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem kreuzende Bohrungen und Austrittsflächen Probleme bei der Partikelabfuhr bereiten [Hei11a].

- **Krümmung der Oberfläche**

Neben der Geschlossenheit hat die Form bzw. die Krümmung der Oberfläche Einfluss auf das Verschmutzungsrisiko bzw. die Partikelfracht. Partikel können auf konkav geformten Oberflächen bzw. Oberflächenbereichen tendenziell besser abfließen als auf konvexen und planen Oberflächen [Kel12] (Abbildung 17).

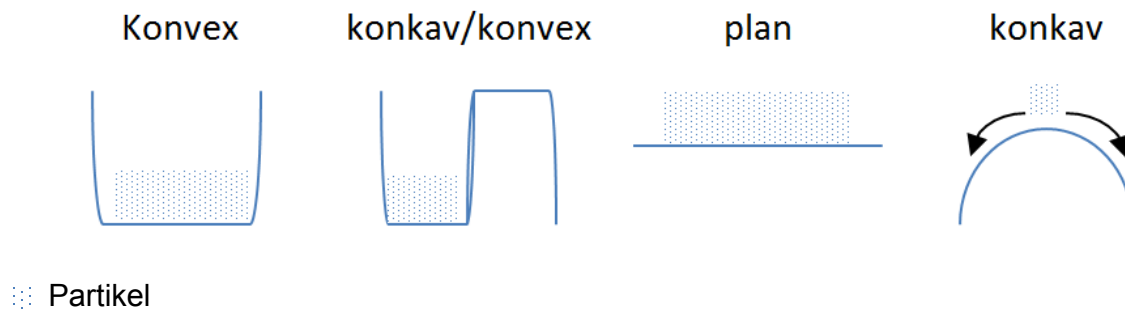


Abbildung 17: Produktbezogener Einflussfaktor: Krümmung der Oberfläche

- **Ecken und Kanten**

Um Strömungstoträume zu vermeiden, in welchen durch eine geringe Vermischung mit dem durchströmenden Fluid eine lange Verweilzeit der Fluidelemente auftritt, sind scharfe Ecken und Kanten zu vermeiden [Hau12]. In Materialflussoperationen lagern sich an diesen Stellen Partikel an und können sich je nach Partikelgröße und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils in den Ecken verhaken (Abbildung 18).

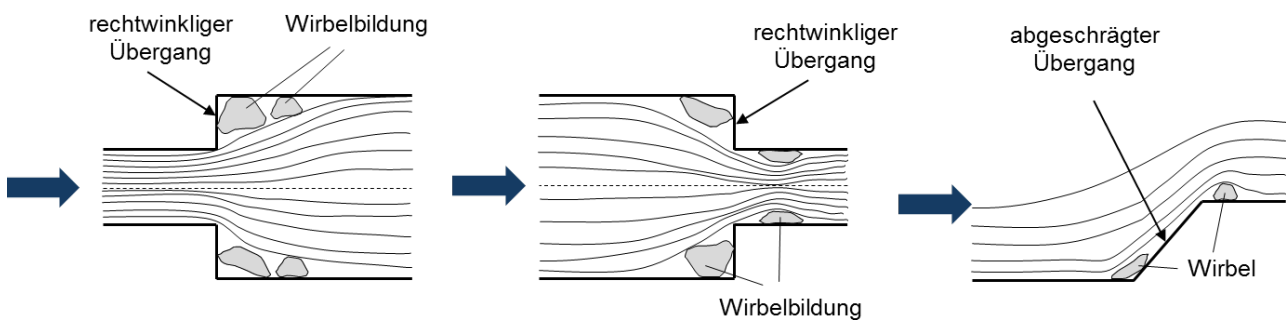


Abbildung 18: Strömungsbedingte Problembereiche in Ecken [Hau12]

Ferner kann durch das Einbringen von Fügefasen die geometrische Fügbarkeit des Bauteils in der Montage erhöht und damit das Risiko des Partikelabriebs in Montagevorgängen durch fehlerhaftes Positionieren vermindert werden. Beim Einsetzen der Bauteile in die Verpackung können ferner durch scharfe äußere Bauteilecken und -kanten Packmittel beschädigt werden und somit den Partikelabrieb in der Verpackung fördern.

4.1.2 Gestaltungsfeld Oberflächenbeschaffenheit

Neben den zuvor beschriebenen Oberflächengeometrien, hat auch die Oberflächenbeschaffenheit Einfluss auf das Rückverschmutzungsrisiko.

- **Rauheit**

Nach [Klo03] können sich Verschmutzungen in rauen, unbearbeiteten Oberflächen festsetzen. Zudem führen Rauheitsspitzen aus strömungsmechanischer Sicht zu Abschattungen in denen sich Partikel ansammeln können. Bei umströmten und durchströmten Objekten reduziert die Rauheit die Strömungsgeschwindigkeit und damit das Risiko der Ansammlung von Partikeln. Somit gilt, je kleiner der Strömungsquerschnitt ist, desto größere Sorgfalt ist auf die Oberflä-

chengüte zu verwenden. Glatte Oberflächen stellen daher allgemein den günstigsten Fall dar [Küm07].

- **Gewinde**

Die Betrachtung des Einflusses von Gewinden auf das Verschmutzungsrisiko ist analog der Betrachtung zu Rauheit zu bewerten. Gewinde vergrößern die kritische Oberfläche und führen abhängig von der Gewindeart zum Einbringen von Ecken und Kanten in die Bauteiloberfläche. Somit können sich insbesondere in Innengewinden Partikel absetzen oder verhaken, da hier an mehreren Punkten Kontakt zum Bauteil besteht. Eine wissenschaftliche Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Gewindearten auf das Rückverschmutzungsrisiko in Materialflussoperationen besteht derzeit nicht. Jedoch ist davon auszugehen, dass gleiche Effekte wie bereits bei der Bauteilgeometrie beschrieben zu beobachten sind.

- **Abriebsfestigkeit von Beschichtungen / Konservierung**

Bei der Untersuchung des Rückverschmutzungsrisikos durch Beschichtungen sind die Abriebsfestigkeit, die Temperatur- und Lösemittelbeständigkeit von Relevanz [Klo03]. Die Abriebsfestigkeit gibt Auskunft über die Fähigkeit, dem Einfluss abrasiver Materialien zu widerstehen und stellt die wesentliche Beschichtungseigenschaft bei der Analyse von Materialflussoperationen und Montagetätigkeiten dar [Gol02]. Um eine Risikobewertung der Rückverschmutzung durch Oberflächenbeschichtungen durchführen zu können, sind neben den genannten Eigenschaften die Haftfestigkeit der Beschichtung auf der Bauteiloberfläche zu ermitteln.

Aufgrund ihrer Sensitivität gegen Abrasion wird Lackierungen, Anstrichen und metallischen Oberflächenbeschichtungen, die zur Flitterbildung neigen (z.B. alle Arten von Zinklamellenüberzügen) ein hohes Rückverschmutzungsrisiko zugeordnet [DSV13] [Klo03]. Zinklamellenüberzüge neigen bei den Materialflussoperationen Handling, Transport und Montage zu verstärktem Abrieb. [DSV13].

Ein geringes Risiko der Bauteilrückverschmutzung in Materialflussoperationen weisen Beschichtungen mit einer hohen Verschleißfestigkeit auf. Beschichtungen mit dieser Eigenschaft sind Kunststoff- und Pulverbeschichtungssysteme sowie Phosphatierüberzüge und galvanische Zink- und Zinklegierungsüberzüge, mit und ohne Versiegelung [DSV13] [Klo03]. Ähnliche Eigenschaften wie Phosphatierüberzügen in Bezug auf Verschleiß, aber auch hinsichtlich Temperatur- und Lösungsmittelbeständigkeit, ordnet Kloke auch Beschichtungssystemen wie Feuerverzinken, keramischen Schichten oder Emailieren zu. [Klo03]

4.1.3 Gestaltungsfeld Werkstoffeigenschaften

Als drittes Gestaltungsfeld, welches die produktbezogenen Einflussgrößen auf das Rückverschmutzungsrisiko determiniert, sind die Eigenschaften des Werkstoffs. Werkstoffe sind Materialien, welche entlang des Wertstroms bearbeitet werden und in das Endprodukt eingehen. Der Werkstoff des Bauteils beeinflusst durch seine Bearbeitung bzw. durch sein Verhalten in Materialoperationen direkt die Ausprägung und Größen-Mengen-Verteilung der entstehenden

Partikel. Werden die Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit im Wertstrom betrachtet, sind zwei wesentliche Aspekte zu trennen:

Ein Aspekt fokussiert die Eigenschaften der Partikel, welche aus der Werkstoffbearbeitung resultieren. Durch die Bearbeitung der Werkstoffe entstehen Partikel, welche die gleichen mechanischen Eigenschaften wie Grundwerkstoff besitzen. Abhängig von dem späteren Einsatz des Bauteils in einer Baugruppe, den dabei aufeinandertreffenden Werkstoffkombinationen und funktionskritischen Oberflächen sowie den definierten Sauberkeitsgrenzwerten können diese Partikel unterschiedliche Schädigungspotentiale aufweisen [Sch10a]. Darüber hinaus determinieren die Werkstoffeigenschaften die einsetzbaren Bearbeitungsprozesse und die dazu eingesetzten Ressourcen.

Folgend sollen Werkstoffeigenschaften betrachtet werden, welche grundsätzlich eine Partikelentstehung und -verschleppung unabhängig von der Art der Partikel fördern. Die Partikelentstehung wird durch das Verhalten des Werkstoffs in den Materialflussoperationen beeinflusst.

- **Magnetismus**

Das Wirken von magnetischen Kräften erhöht das Risiko der Anhaftung von Partikeln auf der Bauteiloberfläche. Dies kann zum einen durch das Anhaften ferromagnetischer Partikel an magnetischen oder magnetisierbaren Oberflächen erfolgen oder durch das Anhaften oder Ansammeln von magnetischen oder magnetisierbaren Partikeln an ferromagnetischen Oberflächen. Auch die Kombination aus beiden Effekten kann auftreten. Durch das Wirken magnetischer Kräfte werden Partikel verhältnismäßig stärker an die Oberfläche gebunden und Partikel lagern sich darauf verstärkt ab. Dadurch wird ein Abfließen bzw. ein Abreinigen von magnetisierten Partikeln von der Bauteiloberfläche im Vergleich zu rein adhäsiv gebundenen Partikeln erschwert.

Hier sind wiederum Wechselwirkungen mit dem Prozess und den Ressourcen zu prüfen. Oberflächen können durch bspw.

- Lasthebemagnete
- Magnetische Spannvorrichtungen (bei Maschinen)
- Bithalter und z. B. Schraubenzieher; magnetische Werkzeughalter
- Elektromotoren (z. B. Flurförderfahrzeug)
- Bearbeitung (besonders bei lokaler Umformung bei fehlendem Schmiermittel)
- Schweißprozesse (Einfluss durch den verwendeten Gleich-Strom)
- Mess- Uhrenständer (mit Permanentmagnet zur flexiblen Anbringung z. B. in Maschinen)
- Kaltumformen (nur bedingt)

magnetisiert werden. [VDA19.2]

- **Elektrostatische Aufladung**

Eine elektrostatische Aufladung kann ebenfalls zu verstärkter Ansammlung von Partikeln an Oberflächen führen. Dabei sind Abhilfemaßnahmen zum Beispiel durch den Einsatz leitfähiger Materialien oder die Ausrüstung mit Ionisationseinheiten zur Kompensation von Aufladungen möglich. [VDA19.2]

Ursachen für elektrostatische Aufladungen können sein:

- Trennen zweier Folien (z.B. beim Abziehen eines Klebestreifens)
- Laufen auf einem Kunststoffteppich
- Reibung verschiedener Materialien aufeinander (Umfüllen von Schüttgütern und Flüssigkeiten)
- Schneiden oder Zerspanen von Nichtleitern
- Influenzwirkung auf im Gleichspannungsfeld befindliche isolierte Leiter

Von diesem Effekt sind besonders Kunststoffe (PE, PP, PTFE, PVC) und Glas betroffen. [Gai02]

- **Chemische Beständigkeit / Beständigkeit gegen Korrosion**

Die chemische Beständigkeit und die Korrosionsbeständigkeit betreffen als Einflussfaktor sowohl die Bauteiloberfläche als auch die nachfolgend beschriebenen Werkstoffeigenschaften. Partikel, welche durch aggressive Medien oder Korrosion aus der Partikeloberfläche herausgelöst werden können, stellen eine Verschmutzung dar [Jel99] [Klo03] (Abbildung 5). Die Auswahl der Oberflächenbeschichtung und der Werkstoffe ist in Verbindung mit der Korrosivität des Prozesses und der dort eingesetzten Medien zu treffen. Dabei spielen die involvierten chemischen Ionen, der pH-Wert und die Temperatur eine wesentliche Rolle [Eur04]. Im Rahmen der hygienegerechten Konstruktion kommen dazu Edelmehle zum Einsatz. Da dies in der industriellen Fertigung nicht flächendeckend realisierbar ist, ist eine Abstimmung zwischen den Bauteilen, der für den Korrosionsschutz eingesetzten Ressourcen (Verpackungen und Verpackungshilfsmittel) oder Medien (Korrosionsschutzöle) und den Prozessen, insbesondere der Bauteilreinigung und der Materialflussoperationen in korrosiver Umgebung, in der Planungsphase vorzusehen.

- **Abriebfestigkeit von Werkstoffen**

Analog zum Einflussfaktor "Abriebfestigkeit von Beschichtungen / Konservierung" beschreibt die Abriebfestigkeit von Werkstoffen die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffoberflächen gegenüber mechanischer Beanspruchung, insbesondere Reibung. Sie wird von den Oberflächeneigenschaften der beteiligten Werkstoffe, hauptsächlich der Rauheit und Härte, bestimmt. Die Härte bezeichnet den Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines sehr viel härteren Körpers entgegensetzt [Hor06]. Weichen Oberflächen eine geringe Härte auf, so werden diese eher mechanisch abgeschert, als härtere. Dies kann in Verpackungsprozessen oder durch gegenseitiges aneinanderreiben von Bauteilen in der Verpackung geschehen. Niedrige Abriebfestigkeiten von Werkstoffen führen somit zu einem höheren Rückverschmutzungspotential [VDA19.2].

- **Gratbildung**

Partikel können darüber hinaus aus abgebrochenen Graten resultieren. Die wichtigsten Einflussfaktoren für eine Gratbildung sind produktseitig die Werkstoffeigenschaften (Umformvermögen, Festigkeit) und Werkstückgeometrie, die Prozessparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Schnitttiefe, Kühlbedingungen sowie die Ressourceneigenschaften Werkzeuggeometrie und -verschleiß. Neigt der verwendete Werkstoff zu Bildung von langen Spänen oder Graten bei der mechanischen Bearbeitung, ist ohne vorhandene Entgratung ein erhöhtes Rückverschmutzungsrisiko zu erwarten, da sich diese mit größerer Wahrscheinlichkeit am Bauteil verhaken [Wei05].

4.2 Prozesseitige Einflussgrößen

Nachdem in dem vorherigen Abschnitt produktbezogene Einflussfaktoren vorgestellt wurden, folgen nun Einflussfaktoren, die aus den Prozessen resultieren. Allgemein bezeichnen Prozesse das spezielle Geschehen zur Transformation von Eingaben in Ausgaben [DIN05b]. Prozesse bewirken die geplante Veränderung der Bauteile durch das Zusammenwirken von Ressourcen in einem geregelten Ablauf. Prozesse werden nach REFA u.a. durch die Prozessart, die Prozesszeit und die Anzahl der Prozessschritte charakterisiert [REF11].

Die Transformationsprozesse des Materialflusses bewirken eine Veränderung in den Dimensionen Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung, Gestalt, Wert und Qualität [Ten07]. Ziel einer sauberkeitsgerechten Gestaltung von Materialflüssen ist es, Materialflussoperationen und die dabei eingesetzten technischen Mittel so zu gestalten, dass ein effizienter Transport von Bauteilen, Komponenten und Aggregaten in der vorgesehenen Sauberkeitsqualität an den Bestimmungsort möglich ist. Welche Transformationsprozesse mit dem Begriff Materialflussoperationen adressiert werden und welche technischen Mittel (Kapitel 4.3) dabei zum Einsatz kommen, zeigt Abbildung 19.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die vier Gestaltungsfelder Fertigung, Montage, Logistik und Handhabung untersucht. Dabei werden die Materialflussoperationen Verpacken, Transport (inner- und außerbetrieblich), Lagerung, Kommissionierung, Umschlagen und Bilden von Ladeeinheiten dem Gestaltungsfeld Logistik zugeordnet. Ferner fokussiert die Materialflussoperation Prüfen in dieser Arbeit nicht die Prüfung des Sauberkeitszustandes, sondern Prüfprozesse, welche im Rahmen der Fertigung und Montage zur Sicherstellung der Funktion des Bauteils dienen. Darunter fallen bspw. Funktionsprüfungen, Dichtheitsprüfungen oder Leitfähigkeitsprüfungen. Da in diesen Prüfprozessen ähnliche sauberkeitsrelevante Vorgänge wie in Fertigungs-, Montage- und Handhabungsprozessen vorzufinden sind (Fügen, Kontrollieren, Sortieren), können die im Rahmen dieser Prozesse analysierten Einflussfaktoren auf die Prüfprozesse übertragen werden.

Transformationsprozesse des Materialflusses		
Materialflussoperatoren	vorrangige Zustandsänderung	technische Mittel
Verpacken, Montieren, Bearbeiten	Zusammensetzung, Wert, Gestalt	Verpackungsmittel, Montagemittel, Fertigungsmittel
Prüfen	_____	Prüfmittel
Lagern	Zeit	Lagermittel
Fördern, Transportieren	Ort	Fördermittel, Verkehrsmittel
Handhaben	Lage, Ort	Handhabungsmittel
Umschlagen	Lage, Ort, Zusammensetzung	Handhabungsmittel, auch Fördermittel, Verkehrsmittel
Bilden von Ladeeinheiten	Menge	Handhabungsmittel, Verpackungsmittel
Kommissionieren	Sorte, Menge, Ort	Lagermittel, Fördermittel, Handhabungsmittel

Abbildung 19: Materialflussoperationen [Ten07]

4.2.1 Gestaltungsfeld Fertigungsprozesse

Fertigungsverfahren lassen sich grundsätzlich in die Klassen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Stoffeigenschaften ändern und Beschichten einteilen [DIN8580]. Allen Verfahren gemeinsam ist die Determinierung der Qualität des Prozessergebnisses durch unterschiedliche Prozessparameter. Aufgrund der Vielzahl von Technologien und Wirkbeziehungen ist eine Einzelfallbetrachtung erforderlich, in der je nach Sauberkeitsanforderungen und Bauteil die Fertigungstechnologie und die Prozessparameter, wie bspw. Vorschub oder Schnittgeschwindigkeit, an die Gegebenheiten angepasst und optimiert werden müssen.

Zu diesem Ergebnis gelangt auch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt „SpanSauber“ unter Leitung des Lehrstuhls für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation der Technischen Universität Kaiserslautern, welches sich mit der spanenden Fertigung beschäftigt [Aur06]. Ziel war es, den Forschungs- und Handlungsbedarf hinsichtlich der Sauberkeit spanend bearbeiteter Bauteile in Bezug auf anhaftende Späne und verbleibende Grate zu analysieren, um Reinigungs- und Entgratungsprozesse, die der spanenden Fertigung nachgeschaltet sind, zu reduzieren. Untersucht wurden in dem Forschungsprojekt insbesondere die Span- und Gratbildung sowie deren Vermessung, die Simulation von Span- und Gratbildung und die industrielle Verbreitung und Anwendung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Thematik der Sauberkeit spanend bearbeiteter Werkstücke. Neben der erforderlichen Entwicklung von branchen- und bauteilangepassten Sauberkeitskonzepten sieht der Ergebnisbericht Handlungsbedarf in der Entwicklung serientauglicher Mess- und Prüftechnik, der Beherrschung der Grat- und Spanbildung sowie der Standardisierung von Span- und Gratklassifikationen.

Der Verband der Elektrotechnikbranche untersucht typische Fertigungsprozesse auf die Partikelentstehung. Die in den Leitlinien zur Technischen Sauberkeit in der Elektrotechnik vorgestellten Untersuchungen beschränken sich dabei auf die Identifikation von Prozessen, welche Partikel generieren. Eine Aussage über jeweilige Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Prozessparameter bleibt jedoch aus [ZVE14]. Inwieweit die Untersuchungsergebnisse auch auf andere Branchen übertragbar sind, ist ferner zu prüfen.

Zur Bewertung des Verschmutzungsrisikos durch Fertigungsprozesse gibt der Fragenkatalog in Anhang A einen auf Leitfragen basierenden Überblick über mögliche Partikelquellen im Fertigungsprozess.

4.2.2 Gestaltungsfeld Montageprozesse

Der Montageprozess ist gekennzeichnet durch das Handhaben, Fügen und Kontrollieren von zahlreichen Bauteilen aus Vorfertigungen der eigenen oder einer fremden Unternehmung [Wie12]. Da das Handhaben eine Tätigkeit sowohl in Montage- als auch in Logistikoperationen ist, wird diese gesondert betrachtet. Auch das Justieren und Ausführen von Sonderoperationen wie zum Beispiel Markieren, Erwärmen, Kühlen oder Entgraten gehört zu den Montagefunktionen [Lot12]. Montageprozesse stellen hohe Anforderungen an die Technische Sauberkeit. Filmische Verschmutzungen wie Öle oder Kühlschmierstoffe sowie partikuläre Verschmutzungen aus den vorhergehenden Fertigungsprozessen können einen negativen Einfluss auf den Montageprozess selbst, und auch auf die Funktionsfähigkeit der Baugruppe haben, wenn sie während des Prozesses eingebracht und anschließend umschlossen werden [Wie12].

Während der Montage sind die Bauteile und Komponenten unmittelbar den potentiell schädlichen Einflüssen der Montageprozesse, sowie denen der Ressourcen ausgesetzt. Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit im Montageprozess können anhand der durchgeführten Operationen folgendermaßen gegliedert werden:

- **Fügen**
 - Partikelabgabe direkt auf Funktionsflächen des Bauteils
z.B.: Beim Schrauben entstehen Partikel in Gewinden, die in den Funktionsraum fallen
 - Partikelabgabe indirekt an die Funktionsflächen
z.B.: Abrieb beim Einfädeln einer Schraubendreherklinge oder Splitter eines Schlagwerkzeugs (bspw. Kunststoffhammer)
- **Kontrollieren**
 - Messen der Bauteile außerhalb des sauberkeitsregulierten Bereichs
- **Justieren**
 - Trennen von Verbindungen
z.B.: Herausdrehen von Schrauben (vgl. VDA Band 19.2 2010, S. 104)
- **Sonderoperationen**

Unter Sonderoperationen werden vielfältige Tätigkeiten subsummiert [Lot12]. Aufgrund der Vielzahl sind diese Operationen einzeln auf Einflussgrößen zu überprüfen bzw. anhand der hier aufgeführten Einflussgrößen zu untersuchen.

- **Nacharbeit**
 - Verlassen des normalen Prozessablaufs
 - Orientierungsänderung
 - Trennung von Verbindungen

Der Einflussgrad der einzelnen Montageoperationen ist derzeit nicht eindeutig quantifizierbar. Auch hier sei auf die Wechselwirkungen der eingesetzten Ressourcen und die Eigenschaften der zu montierenden Bauteile verwiesen.

4.2.3 Gestaltungsfeld Logistikprozesse

Das Betrachtungsfeld der Logistik ist an sich sehr weitreichend, sodass sich im Kontext der Projektbearbeitung auf die Prozesse der Produktionslogistik fokussiert wird. [Dro13]. Der Produktionslogistik kommt die Aufgabe zu, alle Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten zu verketteten und Güter bzw. Halbfertigprodukte innerhalb festgelegter Bereiche zu verteilen [DIN 30781-1 1989].

Die VDA 19.2 gibt zur Vermeidung von Rückverschmutzungen und zur Vorgehensweise bei der Gestaltung von sauberkeitsgerechten Logistikkonzepten allgemeine Empfehlungen. Eine tiefergehende Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Materialflussoperationen und den dabei verwendeten technischen Mitteln erfolgt jedoch nicht.

Auch der Leitfaden der Elektronikindustrie geht über eine Aufstellung von Anforderungen an die Verpackung und Logistik nicht hinaus. Als Anforderungen werden u.a. das gleiche Sauberkeitsniveau von Bauteil und bauteilberührenden Verpackungsflächen, die Sicherstellung der Vermeidung des Partikeleintrags von außen und der Partikelerzeugung in der Verpackung genannt [ZVE14].

Eine sauberkeitsgerechte Logistik hat die Aufgabe, Bauteile und Komponenten in der vorgesehenen Sauberkeitsqualität an den Ort der Bestimmung zu bringen. Bei allen Materialflussoperationen ist dabei unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzuwägen, ob eine vollständige Vermeidung von Partikeln zielführend ist. Allerdings ist sicherzustellen, dass diese nicht auf sauberkeitskritische Funktionsflächen der Bauteile oder Baugruppen gelangen können. [Sch13a] [VDA19.2]

Hinsichtlich des Einflusses von Transportprozessen beeinflussen sowohl die Dauer und die Entfernung zum Zielort die technische Sauberkeit [VDA19]. Darüber hinaus lassen sich Einflussfaktoren wie die Geschwindigkeit, welche wiederum mit der Expositionszeit des Bauteils gegenüber den Einflussfaktoren verknüpft ist, die Transportart und die Art der Bedienung herausstellen [Sch13b].

4.2.4 Gestaltungsfeld Handhaben

Sowohl bei Fertigungs- und Montage- als auch bei Logistikprozessen sind Handhabungsprozesse erforderlich. Handhaben umfasst die räumliche Manipulation der Bauteile, welche sich aus der Veränderung der Position und der Orientierung des Produktes in einem Bezugskordinatensystem zusammensetzt [VDI2860]. In Logistikoperationen werden als Handhabungsvorgänge das Magazinieren, Palettieren, Sortieren, Kommissionieren oder das Bestücken einer Produktionsanlage genannt [Mar04]. Im Bereich der Montage umfassen Handhabungsfunktionen bspw. die Tätigkeiten des Speicherns, Mengen Veränderns oder Bewegens [VDI2860].

Im Bereich der Montage ist das bewegte Gut vordergründig das Bauteil bzw. die Komponenten. Im Bereich der Logistik können sowohl das Bauteil als auch technische Mittel wie z.B. Behälter, Deckel oder Blister, in denen sich das Bauteil befindet, gehandhabt werden.

In Bezug auf die Technische Sauberkeit ist vor allem die Veränderung der Orientierung von Interesse. Durch die räumliche Manipulation von Bauteilen oder technischen Mitteln können sich sedimentierte Partikel von der Bauteiloberfläche lösen und das Bauteil zusätzlich kontaminieren. So können z.B. an der Verpackungsaußenfläche anhaftende Partikel durch die Orientierungsänderung des Deckels über der Behälteröffnung verschmutzt werden. In der Montage sind die Relativbewegungen der Komponenten aus selbigen Gründen zu betrachten.

4.3 Ressourcenbezogene Einflussgrößen

Bezugnehmend auf Abbildung 19 können den jeweiligen Materialflussoperationen die dafür benötigten technischen Mittel zugeordnet werden. Diese Ressourcen wirken sich in der jeweiligen Operation auf den Sauberkeitszustand des Bauteils aus. Der Ressourcenbegriff im industriellen Kontext geht nach [Jon00] über die Betrachtung der technischen Mittel hinaus und beinhaltet zusätzlich strukturelle Einheiten (z. B. Produktionshalle), organisatorische Einheiten (z. B. Meisterbereich) und das Personal. Die ressourcenbezogenen Einflussgrößen können entsprechend der Gliederung der Materialflussoperationen und der Ressourcendefinition wie folgt untergliedert werden:

- Produktionsumgebung
- Personal
- Fertigungseinrichtung
- Montageeinrichtung
- Logistikeinrichtung

4.3.1 Gestaltungsfeld Produktionsumgebung

Die Produktionsumgebung umfasst den Sauberkeitszustand der Raumluft, welcher durch entsprechend gestaltetet Raumkonzepte geregelt werden kann sowie das Layout der Produktionshalle.

- **Raumkonzept**

Das Raumkonzept bezeichnet den Raum, „der die Erzeugnisse und deren Verarbeitung umschließt“ [VDA19.2]. Entsprechend den als kritisch definierten Partikeln und deren Flugfähigkeit (Abbildung 6) kann auf die in der VDA 19.2 definierten Raumkonzepte zurückgegriffen werden. Die Richtlinien in der VDA beschreiben die Art der Raumklimatisierung und -belüftung und die Art der Abgrenzung des Bereichs. Das Raumkonzept wird ferner durch die Ausführung der Zugänge (Fenster, Türen, Schleusen) und die Häufigkeit deren Öffnung determiniert.

- **Layout**

Ein weiterer Einflussfaktor ist das Layout bzw. der Aufstellungsplan innerhalb der Produktionsumgebung [VDA19.2]. Auf der organisatorischen Ebene der Betrachtung der Produktionshalle ist die räumlich Nähe unterschiedlicher Wertströme und deren Wechselwirkung zu untersuchen. Beispielsweise kann ein Schweißprozess eines benachbarten Wertstroms einen negativen Einfluss auf den betrachteten Wertstrom ausüben. Auf Wertstromebene gilt die Möglichkeit von Materialrückflüssen zu prüfen. Ist dieser Fall gegeben, ist durch die zusätzliche Transportstrecke das Rückverschmutzungsrisiko als erhöht einzustufen.

4.3.2 Gestaltungsfeld Personal

Das Personal hat einen wesentlichen Einfluss auf die Sauberkeit eines Bauteils entlang des Wertstroms. Das eingesetzte Personal ist auf der einen Seite für die Beseitigung der Partikel verantwortlich, auf der anderen Seite aber auch Quelle, Überträger und Auslöser von Verschmutzung [VDA19.2].

Der Aspekt der Beseitigung von Verschmutzungen durch das Personal bezieht sich auf die Aspekte der Reinigungen des Bauteils selbst und auf das Sauberhalten des Arbeitsplatzes und des Umfelds [VDA19.2].

Als Quelle kann der Mensch das Bauteil direkt verunreinigen, indem er Partikel in Form von Fasern seiner Kleidung und Haaren abgibt. Dabei handelt es sich um Fasern, die bis zu mehrere Millimeter groß sein können [Sch10]. Auch Hautpartikel, die mehrere Millimeter groß sein können oder Sekrete wie Speichel und Schweiß spielen eine Rolle [VDA19.2]. Die Anzahl der erzeugten, nicht metallischen Partikel des Menschen hängen stark von der Bewegung des Mitarbeiters ab. Je mehr und je schneller Bewegungen durchgeführt werden, desto höher ist die Anzahl an erzeugten Partikeln (vgl. Tabelle 6) [Ram00].

Tabelle 6: Erzeugte Partikel in Abhängigkeit von Bewegung [Ram00]

Tätigkeit	Anzahl erzeugter Teile (0,5 µm und größer pro Minute)
Sitzen oder stehen	100.000
Sitzen, kurze Bewegungen mit Arm oder Kopf	500.000
Sitzen, Bewegung der Arme, Beine oder des Kopfes	1.000.000
Aufstehen	2.500.000
Langsames Gehen	5.000.000
Normales Gehen	7.500.000
Schnelles Gehen (2,5 m/s)	10.000.000
Durchführung von Tätigkeiten	15.000.000 – 30.000.000

Darüber hinaus kann das Personal Partikel verschleppen. Die Verschleppung erfolgt beispielsweise durch die Übertragung von Verschmutzungen durch verunreinigte Handschuhe oder Hände sowie durch Ablegen von Bauteilen auf kontaminierten Oberflächen. Dieser Effekt kann bspw. durch eine unzureichende Trennung der Tätigkeiten in verschmutzten und sauberen Bereichen hervorgerufen werden.

Ein weiterer durch das Personal induzierter Faktor betrifft das Handeln und das Verständnis des Personals. Das Personal, als potentieller Auslöser von Verschmutzungen, kann durch den Kompetenzaufbau hinsichtlich der Bedeutung des Qualitätsmerkmals Technische Sauberkeit in seinem Handeln beeinflusst werden. Ist dieses Verständnis für die Relevanz der Erhaltung des Sauberkeitsniveaus nicht gegeben, besteht das Risiko das Bauteile durch unbewusstes Handeln kontaminiert werden.

4.3.3 Gestaltungsfeld Fertigungseinrichtung

Das Gestaltungsfeld Fertigungseinrichtungen umfasst die Bearbeitungsmaschinen, die dabei eingesetzten Werkzeuge und Hilfsstoffe sowie deren Organisationsform. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Sauberkeitszustand während der Bauteilbearbeitung verringert wird, sofern kein prozessintegriertes Reinigen vorgesehen ist. Während der Bearbeitung können Partikel entstehen, welche sowohl aus der Bearbeitung des Bauteils resultieren als auch aus den folgend beschriebenen Einflussfaktoren hervorgerufen werden und demzufolge abweichende Eigenschaften von denen des Bauteilwerkstoffs aufweisen können.

Bezogen auf Einrichtungen der Fertigung treten die folgenden Verschmutzungsrisiken auf [Sch14] [Sch13a] [VDA19.2] [Jel99]:

- Partikelfreisetzung im Prozessbereich durch Alterung und zunehmenden Verschleiß
- Partikeleinbringung in den Prozessbereich durch verunreinigte Außenflächen von Bauteilen, technischen Mitteln des Materialflusses, Werkzeugen, usw.
- luftgetragene/herabfallende Partikel z. B. beim Öffnen einer Anlage bei einer Funktionsstörung während der Wartung bzw. Instandhaltung

- Verschmutzung der zu verarbeitenden und bereitstehenden Prozesshilfsstoffe (z.B. Schrauben, Nägel, Schweißdrähte usw.) und Verbrauchsmaterialien (bspw. Roh-, Betriebsstoffe, Halbzeuge, usw.)
- Verschmutzung durch Schmier- und Kühlmittel selbst oder durch Inkompatibilität von Schmier- und Kühlmittel nachfolgender Prozesse (Bildung von Reaktionsprodukten)
- Verschmutzungen durch persönliche Schutzausrüstung (PSA) des Personals

4.3.4 Gestaltungsfeld Montageeinrichtung

Die VDA 19.2 setzt sich mit der sauberkeitsgerechten Gestaltung der Montage auseinander. Wesentliche Aussagen zu Einflussfaktoren, welche aus der Montagesystemgestaltung resultieren, sollen in diesem Abschnitt aufgezeigt und erläutert werden. [VDA 19.2]

Eine Einflussgröße in manuellen Montagesystemen ist die Materialbereitstellung. Bauteile und Werkzeuge sollten aufgrund der Gefahr der Partikelverschleppung nicht oberhalb des Produktes aufgenommen werden. Aus selbigem Grund ist das Anbringen von Greifschalen, Ablageflächen oder Ladungsträgern oberhalb des Arbeitsraums als ungünstig zu bewerten. [VDA 19.2]

Analog zu den produktbezogenen Einflussgrößen (Kapitel 4.1) sollte bei der Gestaltung von manuellen Arbeitsplätzen sowie an Montageautomaten auf die minimale Verwendung von horizontalen Oberflächen geachtet werden. Raue Oberflächen mit Vertiefungen und Spalten ermöglichen ebenfalls eine dauerhafte Partikelsedimentation. Ecken und Kanten erleichtern mechanischen Abrieb und sollten möglichst abgerundet werden. [VDA 19.2]

Ferner sollten Ablagen sowie Aufnahmen für Bauteile und Werkzeuge eine minimale Auflagefläche aufweisen, um Partikelablagerungen zu erschweren. Durch eine nach unten offene Gestaltung der Bauteilaufnahme bzw. Arbeitsfläche können Partikelansammlungen minimiert werden. Harte Auflageflächen sind zum Beispiel mit Hilfe einer Gummimatte zu dämpfen, um Werkstücke und Oberflächen vor mechanischem Abrieb zu schonen. Auf weiche Arbeitsauflagen aus Holz oder Kunststoff sollte verzichtet werden, weil sich Partikel darin einlagern und sich das Material leicht abnutzt. [VDA 19.2]

Einhausungen aus Plexiglas-, Gitterelementen oder Schürzen schützen Anlagenbereiche einerseits vor Partikeln aus der Umgebungsluft. Auf der anderen Seite verhindern sie aber auch, dass beim Montageprozess entstehende Partikel in die Umgebung gelangen. Allerdings kann die Abschottung zur Anhäufung von Partikeln führen, weil eine Ausbreitung der Partikel nicht möglich ist. Einhausungen sind so auszuführen, dass sich Verschmutzungen nicht an Stellen ansammeln können, bei denen die Gefahr besteht, dass der Schmutz in die Anlage hineinfällt. Bei Gitterelementen ist zu bedenken, dass diese als Staubfänger fungieren können. [VDA 19.2]

4.3.5 Gestaltungsfeld Reinigungseinrichtung

Entlang des Wertstroms haben auch Reinigungseinrichtungen einen Einfluss auf die Veränderung der Bauteilsauberkeit, da diese dafür eingesetzt werden, Verschmutzungen zu entfernen. Auf die einzelnen Wirkprinzipien und die eingesetzten Reinigungsmedien soll an dieser Stelle nicht eingegangen und auf die Arbeiten von [Bil09] [Bru01] [Haa96] [Klo03] [Wul04] verwiesen werden.

Dennoch resultieren aus der Art der Reinigungsanlage unterschiedliche Organisationsformen, die durch die hieraus resultierenden Materialflussoperationen Einfluss auf die Sauberkeit nach dem Reinigungsprozess besitzen. Diese kann nach unterschiedlichen Konzepten, wie zentral, dezentral, inline und extern organisiert werden [Deu08b]. Darüber hinaus gilt es zwischen universellen Anlagen, welche zur Reinigung von unterschiedlichen Bauteilen mit vergleichbaren Anforderungen an die Reinigung, und spezialisierten Anlagen, welche bauteilspezifisch konfiguriert wurden, zu unterscheiden. In Anlehnung an [Kre10b] und [Kob13] welche Vor- und Nachteile der einzelnen Organisationsformen hinsichtlich Transportaufwand, Engpassrisiko, Durchlaufzeit, Reinigungsqualität und Kosten qualitativ beleuchten, werden in Tabelle 7 Verschmutzungsrisiken durch die Organisationsform abgeleitet.

Versorgungs- und Aufbereitungsanlagen können analog zu den Reinigungsanlagen zentral oder dezentral organisiert werden. Bei einer zentralen Anordnung besteht das Risiko einer Partikelverschleppung bzw. der sog. Cross-contamination [Fry09]. Hier ist die Überwachung und Aufbereitung des Reinigungsmediums von besonderer Bedeutung um Verschmutzungen vorzubeugen.

Tabelle 7: Verschmutzungsrisiken durch die Organisationsform der Reinigungsprozesse [Fry09] [Kre10] [Kob13] [Kre10] [Hil02] [Deu07] [Roc04]

Kriterien	Zentral		Dezentral		Inline	Extern	
	Universal	Spezial	Universal	Spezial		Universal	Spezial
Materialfluss							
Transport	lang	lang	mittel	mittel	kurz	lang	lang
Handlingsaufwand	hoch	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	hoch
Bestand	hoch	mittel	mittel	mittel	gering	hoch	hoch
gerichtet	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein
Reinigungsaufgabe							
Bedarfsorientiert	gering	hoch	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch
Variantenflexibilität	hoch	gering	hoch	gering	gering	hoch	mittel
Engpassrisiko							
Mengenflexibilität	gering	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch
Störungswirkung	hoch	hoch	mittel	mittel	gering	gering	mittel
Kosten							
Betriebskosten (Wartung, Personal...)	gering	gering	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Investitionskosten pro Anlage	hoch	hoch	mittel	mittel	gering	keine	keine
Auslastung	hoch	gering/mittel	hoch/mittel	mittel	mittel	hoch	gering/mittel
Nutzung von Skaleneff.	hoch	hoch	mittel	mittel	gering	hoch	hoch
Fläche je Anlage	hoch	hoch	mittel	mittel	gering	mittel	mittel
Verschmutzungsrisiken							
Primär	<ul style="list-style-type: none"> Cross-contermination Universalanlage erzeugt neue/ andere Partikel Partikelverschleppung 		<ul style="list-style-type: none"> Cross-contermination Universalanlage erzeugt neue/ andere Partikel Partikelverschleppung 		<ul style="list-style-type: none"> Personal nicht entsprechend qualifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> Cross-contermination Universalanlage erzeugt neue/ andere Partikel Partikelverschleppung 	
Sekundär	<ul style="list-style-type: none"> Verweilzeit vor und nach dem Reinigungsprozess Zusätzliches Handling Zusätzlicher Transport 		<ul style="list-style-type: none"> Verweilzeit vor und nach dem Reinigungsprozess Zusätzliches Handling Zusätzlicher Transport 		<ul style="list-style-type: none"> Einfluss von Verke-tungsmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> Verweilzeit vor und nach dem Reinigungsprozess Zusätzliches Handling Transport aus dem Sauberkeitsbereich 	

4.3.6 Gestaltungsfeld technische Mittel des Materialflusses

Bezugnehmend auf die Eingrenzung des Betrachtungsumfangs der Projektbearbeitung auf die Prozesse der Produktionslogistik (Kapitel 4.2.3), soll an dieser Stelle zunächst eine Einordnung der verschiedenen technischen Mittel, die im Rahmen innerbetrieblicher Materialflusssysteme Anwendung finden (Abbildung 20), erfolgen. Martin gliedert die technischen Mittel des Materialflusses in Lager-, Förder- und Handhabungstechnik [Mar04]. Die eingesetzte Behälter- und Verpackungstechnik spielt entlang des Wertstroms eine allzeitbegleitende Hilfsfunktion [Arn04].

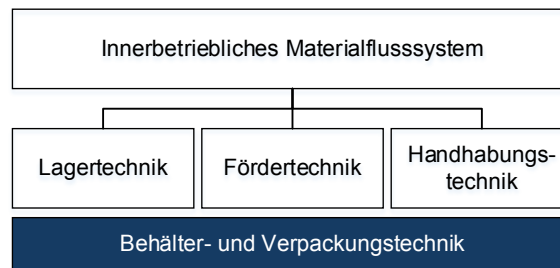


Abbildung 20: Gliederung innerbetrieblicher Materialflusssysteme [Mar04]

Im Vergleich zu Montage- und Fertigungsprozessen ist das Bauteil innerhalb der Materialflussprozesse nicht zwangsläufig dem direkten Einfluss der Umwelt ausgesetzt. Da in Materialflussprozessen keine Zustandsänderung hinsichtlich Wert und Gestalt vorgenommen wird, kann durch den Einsatz von Behälter- und Verpackungstechnik eine Barriere zwischen dem Bauteil und den Umwelteinflüssen aufgebaut werden. Durch den Aufbau mehrerer Verpackungsstufen kann das Bauteil im inneren der Verpackung vor negativen Einflüssen bspw. Lager-, Förder- und Handhabungstechnik geschützt werden und eine Verschleppung von Partikel bis zum Montageort wird unterbunden. Da somit das Verpackungskonzept das entscheidende Kriterium für die Beherrschung des Sauberkeitszustandes entlang der Materialflussprozesse darstellt, soll dieses im weiteren Verlauf näher betrachtet werden.

Die Verpackung umfasst dabei alle verwendeten Packmittel und Packhilfsmittel. Packmittel bilden dabei die Hauptkomponente der Verpackung, welche das Produkt aufnimmt und teilweise oder vollständig umschließt (z.B. Folie, Beutel oder Karton). Packhilfsmittel ergänzen die Funktion der Packmittel, indem diese den Zusammenhalt der Packmittel sicherstellen (z.B. Klebeband) und einen zusätzlichen Schutz vor mechanischen Einflüssen bieten [Mar04].

Ferner wird in Primär- und Sekundärverpackung unterschieden [Ble11]. Während die Primärverpackung in direktem Kontakt mit dem Bauteil steht, fassen Sekundärverpackungen vorverpackte Produkte zu größeren Einheiten zusammen. Welche Mechanismen zur Rückverschmutzungen des Bauteils innerhalb der Verpackung und durch die Verpackung selbst hervorgerufen können, zeigt Abbildung 21.

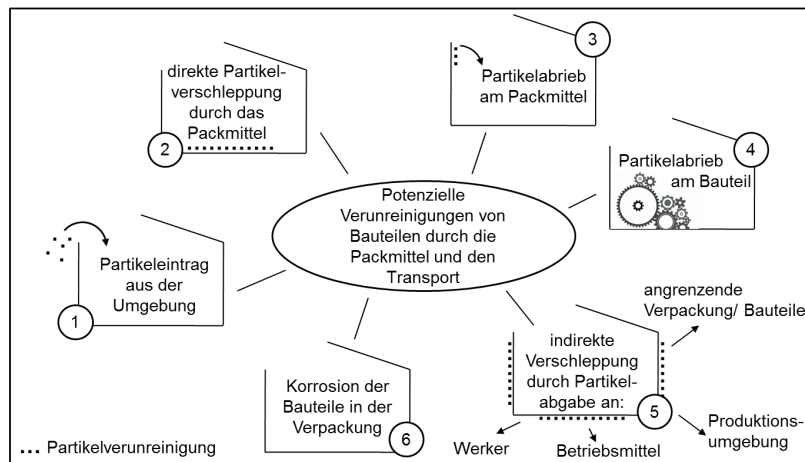


Abbildung 21: Mechanismen, welche zur Verschmutzung des Bauteils führen [VDA19.2]

Der Primärverpackung kommt die Aufgabe zu, die Bauteiloberfläche vor Partikelkontamination aus der Umgebung zu schützen (Mechanismus #1). Dabei sind Öffnungen der Verpackungen (Anzahl und Verschluss) sowie Fördervorbereitung (z.B. Grifföffnungen) zu berücksichtigen.

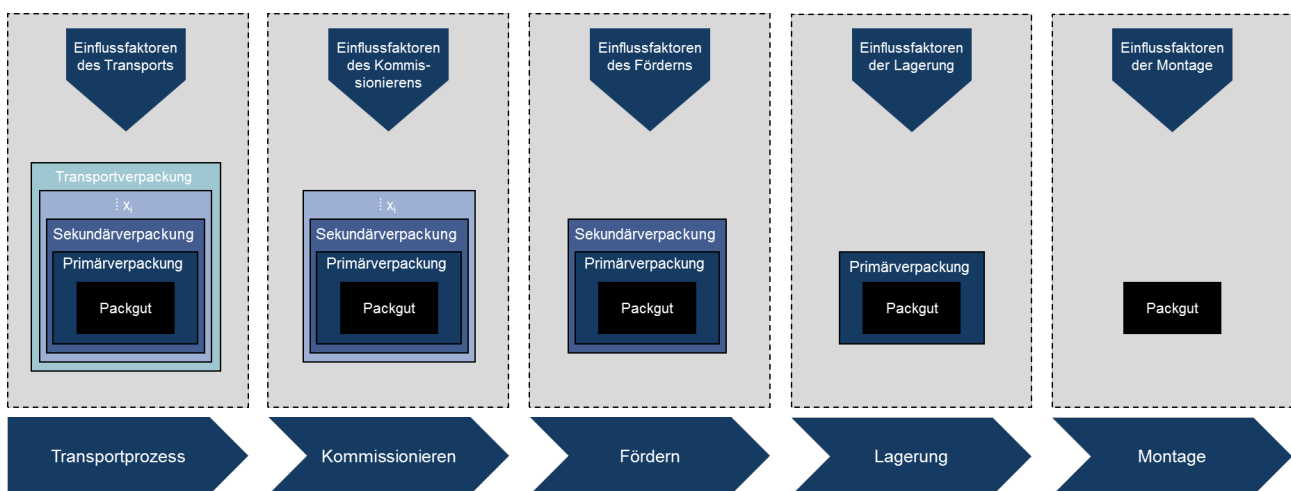
Wechselwirkungen zwischen Verpackung und Bauteil, welche zu Rückverschmutzungen führen können, zeigen die in Abbildung 21 dargestellten Mechanismen #2 und #3. Um die in Mechanismus #2 beschriebene Partikelverschleppung durch die Primärverpackung auszuschließen, können zum einen Einwegverpackungen eingesetzt werden oder Mehrwegverpackungen, welche in zu definierenden Intervallen entsprechend gereinigt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass die produktberührenden Flächen den gleichen Sauberkeitsgrenzwerten genügen, wie das Bauteil. Bei Mehrwegverpackungen spielt insbesondere die Reinigungsfähigkeit und die Art der Reinigung eine große Rolle. Die Reinigungsfähigkeit von Verpackungen wird analog zur Reinigungsfähigkeit eines Bauteils von dessen Geometrie, dessen Oberflächenbeschaffenheit und des Werkstoff determiniert. Nach Kaßmann ist dabei auch die Faltbarkeit der Verpackungen bzw. Behälter zu berücksichtigen, da starre Behälter leichter zu reinigen sind [Kaß14]. Untersuchungen zur Reinigung von Verpackungen wurden ferner durch Rose durchgeführt [Ros97]. Dazu stellt die VDA19.2 eine Bewertung der Eignung der verfügbaren Behälterreinigungsverfahren in Abhängigkeit vom eingesetzten Packmittel dar [VDA19.2].

Mechanismus #3 und #4 resultieren aus Relativbewegungen zwischen Bauteil und Verpackung bzw. zwischen Bauteilen. Der Partikelabrieb ist dabei zum einen von der Abriebsfestigkeit der Bauteile (vgl. Kapitel 4.1.2) und der Primärverpackung sowie der Packweise der Bauteile abhängig [VDA19.2]. Dabei gilt, je stärker das Bauteil in der Verpackung fixiert ist, desto geringer sind die Relativbewegungen und das dadurch entstehende Rückverschmutzungsrisiko.

Ausgehend von den in Abbildung 21 dargestellten Verschmutzungspotentialen durch die Wechselwirkung des Bauteils mit der Primärverpackung sowie den Wechselwirkungen der Bauteile untereinander ist zu prüfen,

- ob das Verpackungsmaterial durch das Einsetzen bzw. Entnehmen des Bauteils abgerieben werden kann,
- ob Bauteile sich durch Relativbewegungen untereinander verschmutzen können,
- ob in der Verpackung Kondensate entstehen können,
- ob die Reichweite der Bauteile innerhalb einer geöffneten Primärverpackung gerechtfertigt ist,
- ob durch Stapeln unterschiedlicher Arten von Ladungsträgern Schmutz in die Primärverpackung eindringen kann (bspw. durch das Stapeln von Verpackungen auf einen größeren Behälter mit innerliegendem Deckel),
- ob Mehrwegverpackungen entsprechend den Bauteilgrenzwerten reinigbar sind,
- ab wann Verpackungen aufgrund von Beschädigungen ausgetauscht werden müssen,
- ob die Verpackung komplett geschlossen werden kann und
- ob durch Komprimierung der Mehrwegverpackung Partikel durch Abrieb entstehen können.

Mechanismus #5 betrifft die Verschleppung von Partikeln durch die Außenfläche der Verpackung. Um diese beherrschen zu können, wird die bauteilberührende Primärverpackung von mehreren Stufen Sekundärverpackungen umgeben. Der Sekundärverpackung kommt dabei die Aufgabe zu, Partikelverschleppungen entlang der Materialflussoperationen von der Anlieferung bis zum Montageort zu vermeiden. Dieser mehrstufige Verpackungsaufbau wird auch als „Zwiebelschalenprinzip“ bezeichnet (Abbildung 21) [VDA19.2].



x_i = weitere Verpackungsstufen

Abbildung 22: Zwiebelprinzip entlang der Materialflussoperationen

Ferner ist bei der Risikoanalyse der Sekundärverpackung auf die Möglichkeit einer Partikelverschleppung durch bspw. elektrostatische Aufladung der Oberfläche oder durch Hinterschneidungen zu achten. Beim Übergang zu einem Fertigungsbereich mit einer höheren Sauberkeitsanforderung ist deshalb ein Entfernen einer Verpackungsstufe vorzusehen.

Der mit „Korrosion der Bauteile in der Verpackung“ beschriebene Mechanismus #6 betrifft das Gestaltungsfeld Korrosionsschutz. Partikelentstehung durch Korrosion ist explizit nicht Teil der

Betrachtung des Forschungsvorhabens. Zur tiefergehenden Erläuterung zu dem Thema Korrosionsschutz in der Verpackungstechnik sei auf die Ausführungen von [Esc07] und [Sch11] verwiesen.

Die Einflussfaktoren, welche durch Verpackungen hervorgerufen werden, sind zusammenfassend in der morphologischen Analyse von Verpackungen in Abbildung 23 abgebildet.

	Merkmals	Ausprägung Verpackung									
	Größe	Kleinladungsträger					Großladungsträger				
	Teileberührender Packstoff	Pappe	Holzwerkstoff		Aluminium			Kunststoff		Vollholz	Stahl
	Form	rund			quadratisch				rechteckig		
	Wandung	hinterschnittig	Keine Wandung		durchbrochen		strukturiert	gedämmt		dicht	
	Funktion	tragend			umschließend				abschließend		
	Öffnungen	Eins			Zwei				Mehrfach		
	Verschluss	kein			Deckel				Verpackungshilfsmittel		
	Wiederverwendbarkeit	Einweg					Mehrweg				
	Unterfahrbarkeit	nicht unterfahrbar			2-Wege unterfahrbar				4-Wege unterfahrbar		
Fördervorbereitung	Vertikal	keine	Rollenbahnfähiger Boden		Rollen		Bodenroller		Öffnungen für Gabel		
	Horizontal	keine			Griffmulden			Ösen		Öffnungen für Gabel	
	Komprimierbarkeit	Ja					Nein				
Nestbarkeit	Leergut	Ja					Nein				
	Vollgut	Ja					Nein				
Lagen im Behälter	Vertikal	keine	Eins			Zwei			Mehrere		
	Horizontal	keine	Eins			Zwei			Mehrere		
Beständigkeit	Temperatur	Ja					Nein				
	Korrosion	Ja					Nein				
	Entflammbarkeit	Ja					Nein				
	Chemisch	Ja					Nein				
	ESD	Ja					Nein				
IP-Schutzklasse	Schutz gegen Fremdkörper	keine	1 (50µm)	2 (12,5µm)	3 (2,5µm)	4 (1µm)	5 (staubgeschützt)		6 (staubdicht)		
	Schutz gegen Wasser	keine	1	2	3	4	5	6	7	8	9K
	Informationsträger	Fasermaler		Karte Außen			Karte Innen			Aufkleber	

Abbildung 23: Morphologisches Schema zu den Eigenschaften von Verpackungen und Ladungsträgern [Arn04] [Hei11b] [Jün99] [Koe12] [Mar04] [Mar08] [Ten07]

4.4 Zusammenfassung der Einflussgrößen

Ausgehend von dem in Kapitel 3.2 dargestellten Modellierungsansatz wurden in diesem Kapitel Einflussgrößen untersucht und nach den Klassen Produkt, Prozess, und Ressource gegliedert. Auf der Grundlage der in der bestehenden Literatur beschriebenen Wirkung singular betrachteteter Einflussgrößen konnten Risikopotentiale abgeleitet werden, welche bei der Planung sauberkeitsgerechter Materialflüsse Berücksichtigung finden sollten. Um in der Planungsphase basierend auf dem Kenntnis der Einflussgrößen Aussagen über mögliche Veränderungen des Sauberkeitszustandes in bestimmten Materialflussoperationen ableiten zu können, ist jedoch die Untersuchung des Zusammenwirkens der Einflussfaktoren auf den Sauberkeitszustand des Bauteils sowie des Einflussgewichtes entscheidend. Wie aus der Analyse der Einflussfaktoren ersichtlich wird, bestehen jedoch eine Vielzahl an Einflussgrößen unterschiedlicher Wirkung und Ausprägung. Zum Aufbau eines mathematischen Modells zur prospektiven Bewertung der Verschmutzung durch einzelne Operationen ist eine Quantifizierung dieser Einflussgrößen erforderlich.

Derzeit ist nur eine sehr eingeschränkte Datenlage zu Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Einflussfaktoren verfügbar. Dies lässt sich auf die Vielfalt der Einflussgrößen sowie deren Ausprägungen und Wechselwirkungen zurückführen. Insbesondere im Bereich der Verpackung bestehen vielfältige Arten von Behälterausführungen und Kombinationsmöglichkeiten. Die Untersuchung der mit dieser Vielfalt exponentiell ansteigenden Anzahl an möglichen Wechselwirkungen war in der zur Verfügung stehenden Projektlaufzeit nicht zu leisten. Als Grundlage zum Aufbau der Datenlage bzgl. der Wechselwirkungen wird nachfolgend ein systematisches Vorgehen vorgestellt, wie durch systematisches Experimentieren dieses Wissen aufgebaut und für die Identifikation von sauberkeitskritischen Bereichen abgeleitet werden kann. Eine Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Einflussgrößen wird anschließend exemplarisch vorgestellt.

5 Leitfaden zur Planung und Gestaltung sauberkeitsgerechter Materialflüsse

Um Wertströme systematisch sauberkeitsgerecht planen und gestalten zu können, ist die Definition der Sauberkeitsgrenzwerte (Kapitel 2.4) sowie die prospektive Bestimmung der Veränderung des Sauberkeitsniveaus des Bauteils innerhalb der einzelnen Materialflussoperationen entlang des Wertstroms erforderlich. Dabei unterliegt die Veränderung des Sauberkeitszustands zahlreichen Einflussfaktoren, die es zu identifizieren und analysieren gilt. Diese Einflussfaktoren sind produkt-, prozess- und ressourceninduziert und lassen sich derzeit lediglich singular und meist nur qualitativ beschreiben (Kapitel 4). Da zudem keine Möglichkeit besteht, die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren auf den Sauberkeitszustand in der Planungsphase quantifizieren zu können, soll an dieser Stelle ein systematisches Vorgehen aufgezeigt werden, welches in bestehende Methoden des Qualitätsmanagements (Kapitel 2.6) integriert werden kann. Dazu werden zunächst bestehende Methoden des präventiven Qualitätsmanagements auf deren Adaptierbarkeit auf die Erfordernisse der Technischen Sauberkeit hin untersucht. Anschließend wird ein systematisches Vorgehen zur Risikoanalyse sauberkeitsgerechter Materialflüsse in Form eines Leitfadens vorgestellt.

5.1 Anforderungsdefinition an einen Leitfaden zur Modellierung von Materialflüssen und Risikobewertung hinsichtlich Technischer Sauberkeit

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt wurde, werden die Anforderungen an das Qualitätsmerkmal Technische Sauberkeit nicht ausschließlich vom Endkunden sondern zudem von den einzelnen Materialflussoperationen definiert. Somit stehen alle Prozesse innerhalb eines Wertstroms in einem Kunden-Lieferanten-Verhältnis zueinander. Aus diesem Grund muss eine Methodik zur Modellierung und Analyse des Risikos kritischer Rückverschmutzungen den spezifischen Anforderungen beider Anforderungsgruppen gerecht werden können. Darüber hinaus muss die Darstellung des gesamten Systems und auf differenzierten Dekompositionsebenen bzw. Detaillierungsgraden möglich sein, da auch die klassische Planung und Gestaltung von Wertströmen auf unterschiedlichen Ebenen erfolgt. (Vgl. Kapitel 3).

Eine weitere Anforderung besteht darin, die derzeit lediglich singularen und meist qualitativ erfassbaren Einflussfaktoren abzubilden und das Rückverschmutzungsrisiko durch Bewertung der Faktoren sowie deren Wechselwirkungen ableiten zu können. Dazu muss es möglich sein, sowohl Prozesse als auch sich entlang des Wertstroms verändernde Ressourcen und Produkteigenschaften abzubilden. Darüber hinaus soll der Leitfaden den Stand der Technik der Messung und Analyse insbesondere partikulärer Verschmutzungen berücksichtigen (Kapitel 2.6.1). Zudem sollen durch einen Abgleich von Sauberkeitsanforderungen des Kundenprozesses mit dem erzeugten Sauberkeitsniveau der vorhergehenden Prozesse schnell sauberkeitskritische Operationen identifiziert und analysiert werden können. Dadurch können dort wirkende Einflussfaktoren priorisiert und gezielt optimiert werden.

Ferner soll der Leitfaden als Grundlage dienen, Erkenntnisse aus Versuchen oder Erfahrungen für folgende Analysen nutzbar zu machen. Das Vorgehen soll dabei in die Planungspro-

zesse des Produktentstehungsprozess integrierbar sein, um einen möglichst geringen Zusatzaufwand zu generieren.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt bestehende Methoden des präventiven Qualitätsmanagements auf ihre Adaptierbarkeit auf die Technische Sauberkeit hin überprüft.

5.2 Untersuchung der Adaptierbarkeit bestehender Methoden des präventiven Qualitätsmanagement auf Technische Sauberkeit

Bezugnehmend auf die Anforderung der Integrierbarkeit des Leitfadens in bestehende Planungsprozesse der Produktentstehung sollen in diesem Kapitel bestehende Methoden des präventiven Qualitätsmanagements (vgl. Abbildung 7) vorgestellt und auf deren Adaptierbarkeit auf die Technische Sauberkeit hin untersucht werden. Die Untersuchung bezieht sich dabei auf folgenden Methoden:

- Quality Function Deployment (QFD)
- Fehlerbaumanalyse (FTA)
- Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)
- Design of Experiments (DoE)

Als Kriterien für die Adaptierbarkeit werden die eingangs beschriebenen Anforderungen herangezogen.

5.2.1 Quality Function Deployment (QFD)

- **Methodenbeschreibung**

QFD dient zur Aufnahme von Kundenanforderungen zu Beginn einer Produktentwicklung und der Umsetzung dieser in der Produkt- und Prozessentwicklung. Darüber hinaus dient die Methodik der Sicherstellung und Messung der Erfüllung der Anforderungen entlang des Produktentstehungsprozesses.

- **Vorgehen und Systembezug**

Der QFD-Prozess startet mit der Ermittlung der Kundenanforderungen an das Produkt und überführt diese in Qualitätsmerkmale. Diese Merkmale werden technisch und wirtschaftlich bewertet und in eine Zielkostenfunktion übertragen. Die dadurch priorisierten Produktcharakteristika können weiter in priorisierte Komponenteneigenschaften und Prozessparameter heruntergebrochen werden [Töl09].

- **Detaillierungsgrad**

Die Anforderungen können durch die Überführung in Qualitätsmerkmale und weiter in priorisierte Komponenteneigenschaften, Prozessparameter und Zielgrößen der Produktionsplanung sowohl auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen der Planung als auch der Anforderungen selbst berücksichtigt werden.

- **Bewertung der Kenngrößen**

Die Formulierung der Anforderungen erfolgt dabei sowohl qualitativ als auch quantitativ.

- **Adaptierbarkeit auf die Technische Sauberkeit**

Durch die Möglichkeit der Formulierung von Sauberkeitsgrenzwerten (vgl. Kapitel 2.4) können vom Kunden genaue Anforderungen an das Produkt gestellt werden. Das Herunterbrechen dieser Anforderungen auf einzelne Prozesse folgt dem Ansatz des Forschungsvorhabens und stellt eine wesentliche Eingangsgröße für eine sauberkeitsgerechte Risikobewertung dar. Um Sauberkeitsanforderungen von der Produktebene auf die einzelnen Prozesse übertragen zu können, ist zunächst eine Analyse der kritischen Verunreinigungen in Bezug auf die Produktkomponenten durchzuführen. Dabei ist zu prüfen, welche kritischen Partikel durch welche Komponente an die funktionskritischen Flächen gelangen können. Sind die sauberkeitskritischen Komponenten identifiziert, kann die Betrachtung gezielt auf deren Wertströme und den dort identifizierbaren Einflussfaktoren ausgeweitet werden.

5.2.2 Fehlerbaumanalyse (FTA)

- **Methodenbeschreibung**

Die Fehlerbaumanalyse dient der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen und Produkten und ist eine nach DIN 25424 beschriebene Methode zur Analyse eines unerwünschten Top-Ereignisses [Goe04]. Dieses kann ein bereits eingetretener oder angenommener Fehler sein. Dabei handelt es sich um eine deduktive Analyse, auf Grundlage der booleschen Algebra [Mey10]. Der Zweck der FTA besteht im Auffinden aller Kombinationen von Fehlern, die zum Top-Ereignis führen können. Der Bezug wird dabei über einen Fehlerbaum dargestellt.

- **Vorgehen und Systembezug**

Der klassische Ablauf der Fehlerbaumanalyse beginnt mit einer Analyse des Systems bei der die Elemente des Systems identifiziert und ihr Zusammenwirken festgestellt wird [DIN 81]. Auf Basis der Definition eines Top-Ereignisses wird der Fehlerbaum erstellt und ausgewertet. Durch die Vergabe von Wahrscheinlichkeitswerten zwischen 0 und 1 kann die Abhängigkeit des Eintretens des Top-Ereignisses vom jeweiligen Fehler ausgedrückt werden.

- **Detaillierungsgrad**

Durch die Bildung unterschiedlicher Ebenen innerhalb des Fehlerbaums kann der Detaillierungsgrad beliebig hoch gestaltet werden.

- **Bewertung der Kenngrößen**

Die FTA bringt zwei wesentliche Vorteile mit sich. Zum einen stellt sie Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren dar und bietet zudem die Möglichkeit, die Auswirkungen dieser Einflussfaktoren durch die Angabe von Wahrscheinlichkeiten zu quantifizieren.

- **Adaptierbarkeit auf die Technische Sauberkeit**

Die FTA kann zur Analyse der Zusammenhänge der in Kapitel 4 dargestellten Einflussfaktoren auf das Top-Ereignis „Sauberkeitsniveau unterschritten“ genutzt werden. Hinsichtlich der Zusammenhänge der Einflussfaktoren und der Einflusswahrscheinlichkeiten sind für die Anwen-

derung in der Planungsphase in der Regel keine sauberkeitsgerechten Fehlerbäume bekannt. Die Methodik der FTA bietet jedoch eine systematische Methodik, um die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren zu visualisieren und bei vorhandener Datenbasis auch zu untersuchen.

5.2.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

• Methodenbeschreibung

Die FMEA ist eine präventive, analytische Methode des Qualitätsmanagements. Sie ist ein systematisches und gut strukturiertes Verfahren, mit dem potenzielle Schwachstellen (Fehler und Risiken) eines Systems schon früh in der Entwicklungsphase des Produktes oder Prozesses erkannt werden können. Die FMEA verfolgt das Ziel der Risikoverminderung bzw. -vermeidung [Pfe 01].

• Vorgehen und Systembezug

Das Vorgehen bei der FMEA ist induktiv, d. h. es wird nicht vom Ausfall eines kompletten Systems, sondern von Fehlern in einzelnen Elementen eines Produkts oder Prozesses ausgegangen [Bre 12]. Die FMEA wird dabei in unterschiedlichen Phasen des PEP angewendet. Grundsätzlich lässt sich die FMEA bezogen auf den Startzeitpunkt in eine präventive und eine korrektive Dimension unterteilen. In der Planungsphase nimmt die FMEA entwicklungsbegleitend dementsprechend präventive Dimension ein und kann zusammen mit einer vorgeschalteten Systemanalyse Fehlerrisiken identifizieren und Optimierungspotentiale ausweisen (vgl. Abbildung 24).

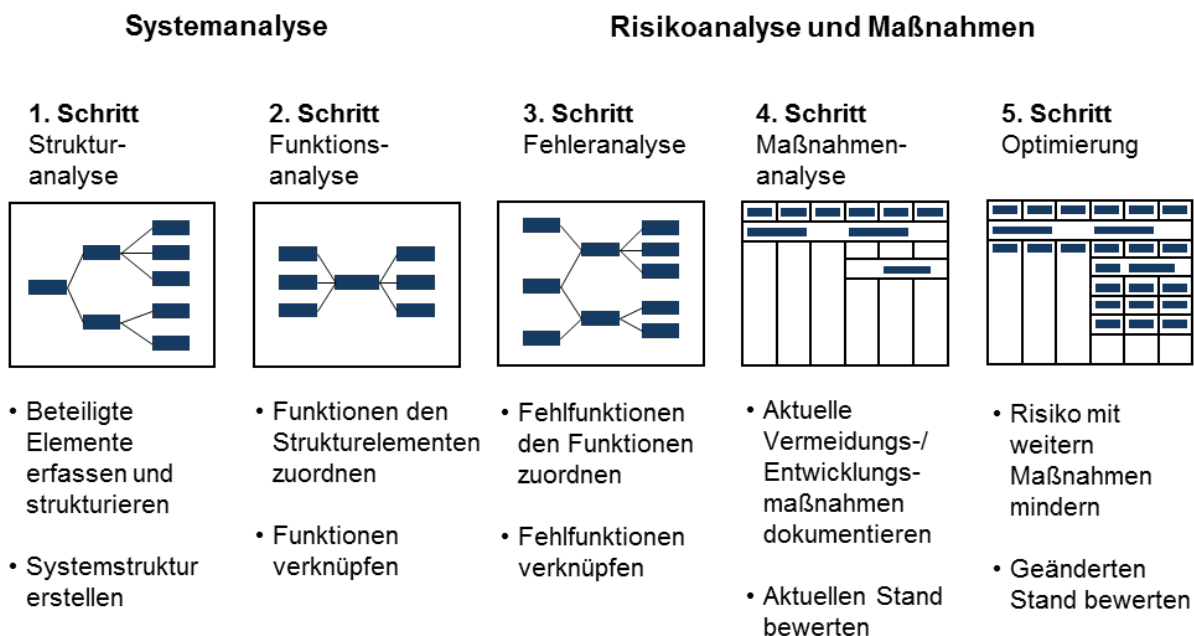


Abbildung 24: Ablauf FMEA [VDA4.2]

Wie die Abbildung zeigt, kann das Vorgehen der FMEA in 5 Schritte untergliedert werden. Innerhalb der ersten beiden Schritte wird das System mit seinen Elementen und deren Verknüpfungen modelliert. Daran anschließend erfolgen Fehleranalyse und -bewertung. Die Quantifi-

zierung des Risikos eines Fehlers wird über die Berechnung einer Risikoprioritätszahl (RPZ) vorgenommen. Diese ergibt sich aus dem Produkt der Auftretenswahrscheinlichkeit (A), der Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) und der Bedeutung des Einflussfaktors bzw. des Fehlers (B) für den Kunden.

$$RPZ = A * B * E$$

mit

RPZ	Risikoprioritätszahl
A	Auftretenswahrscheinlichkeit
B	Bedeutung des Fehlers
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit

Die Schritte vier und fünf der FMEA dienen der Erfassung aktueller Maßnahmen zur Vermeidung oder Entdeckung von Fehlern und zur Ableitung von Optimierung.

Je nach Untersuchungsobjekt wird zwischen Produkt-FMEA und Prozess-FMEA unterschieden. Die Produkt-FMEA betrachtet die möglichen Fehlfunktionen oder Funktionsfehler eines Produktes. Mithilfe der Prozess-FMEA können potenzielle Fehler im Produktionsprozess untersucht und bewertet werden. [VDA4.2]

- **Detaillierungsgrad**

Der Detaillierungsgrad der FMEA nach [VDA4.2] fokussiert die Betrachtung von Fehlern, welche zum Ausfall des Produktes beim Endkunden führen können. Einflussfaktoren auf die Entstehung der Fehler werden in der klassischen FMEA nicht abgebildet.

- **Bewertung der Kenngrößen**

Die Bewertung der Faktoren erfolgt nach einem mehrstufigen Schema. Die Einstufung der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Entdeckungswahrscheinlichkeit erfolgt dabei quantitativ, die der Bedeutung des Fehlers dagegen qualitativ.

- **Adaptierbarkeit auf die Technische Sauberkeit**

Der Analyse und Bewertung von Materialflüssen liegt die Prozessbetrachtung zu Grunde. Daher wird bezugnehmend auf das grundsätzliche Vorgehen bei der Prozess-FMEA (Abbildung 24) zunächst die Adaptierbarkeit der Systemanalyse und anschließend die erforderlichen Anpassungen im Rahmen der Risikoanalyse betrachtet. Betrachtet werden hier jedoch nicht Fehler, die durch die Sauberkeit hervorgerufen werden, sondern ausschließlich die sauberkeitsbeeinflussenden Größen.

Systemanalyse: Sauberkeitsgerechte Wertstromanalyse

Ausgangspunkt der FMEA ist eine Analyse des Gesamtsystems, in welcher die Systemelemente respektive Prozesse erfasst, deren Funktionen zugeordnet und Verknüpfungen dargestellt (vgl. Abbildung 24) werden. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3 kann unter Anwendung der Methodik Wertstromanalyse ein System modelliert werden. Zur Analyse eines

sauberkeitsgerechten Wertstroms sind einerseits die klassischen prozessbezogenen Wertstromdaten um die Ressourcendaten sowie die sich entlang des Wertstroms veränderten Produktdaten zu erweitern. Andererseits sind die Sauberkeitsgrenzwerte der einzelnen Prozesse in der Modellierung zu ergänzen (vgl. Abbildung 15). Die sauberkeitsgerechte Wertstromanalyse beginnt mit der Bestimmung des Endkunden und dessen Sauberkeitsanforderungen an das entlang des Wertstroms entstehende Bauteil (Vgl. Kapitel 5.2.1). Anschließend erfolgen die Aufnahme der Transformationsprozesse und deren Verknüpfungen durch Logistikprozesse. Anhand der Sauberkeitsanforderungen des Endkunden, welcher außerhalb des Wertstroms steht, und den individuellen Anforderungen der einzelnen Prozesse können auch hierfür Sauberkeitsgrenzwerte definiert werden.

Ziel der Analyse ist es, neben den Prozessen und deren Verknüpfungen mögliche Einflussfaktoren auf die Sauberkeit der Bauteile zu identifizieren und deren Ausprägungen aufzunehmen. Mit Hilfe der anschließend erfolgenden Risikobewertung soll die Veränderung des Sauberkeitsniveaus durch die Wirkung der Einflussfaktoren innerhalb des Prozesses und somit auf den Sauberkeitszustand des Bauteils nach dem Prozess (Output) bewertet werden können. Durch den Abgleich des möglichen Prozessoutputs mit den Anforderungen des Folgeprozesses können somit sauberkeitskritische Prozesse identifiziert werden. Anschließend bilden die analysierten Einflussfaktoren die Grundlage für gezielte Optimierungsmaßnahmen. Abbildung 25 zeigt die exemplarische Darstellung einer sauberkeitsgerechten Wertstromanalyse und ausgewählte Einflussfaktoren auf die Sauberkeit der Bauteile. Da diese Analyse zudem als Datengrundlage für die Optimierungsmaßnahmen dienen soll, besteht die Möglichkeit, die im Rahmen der Risikoanalyse ermittelte Folgebewertung mit aufzunehmen.

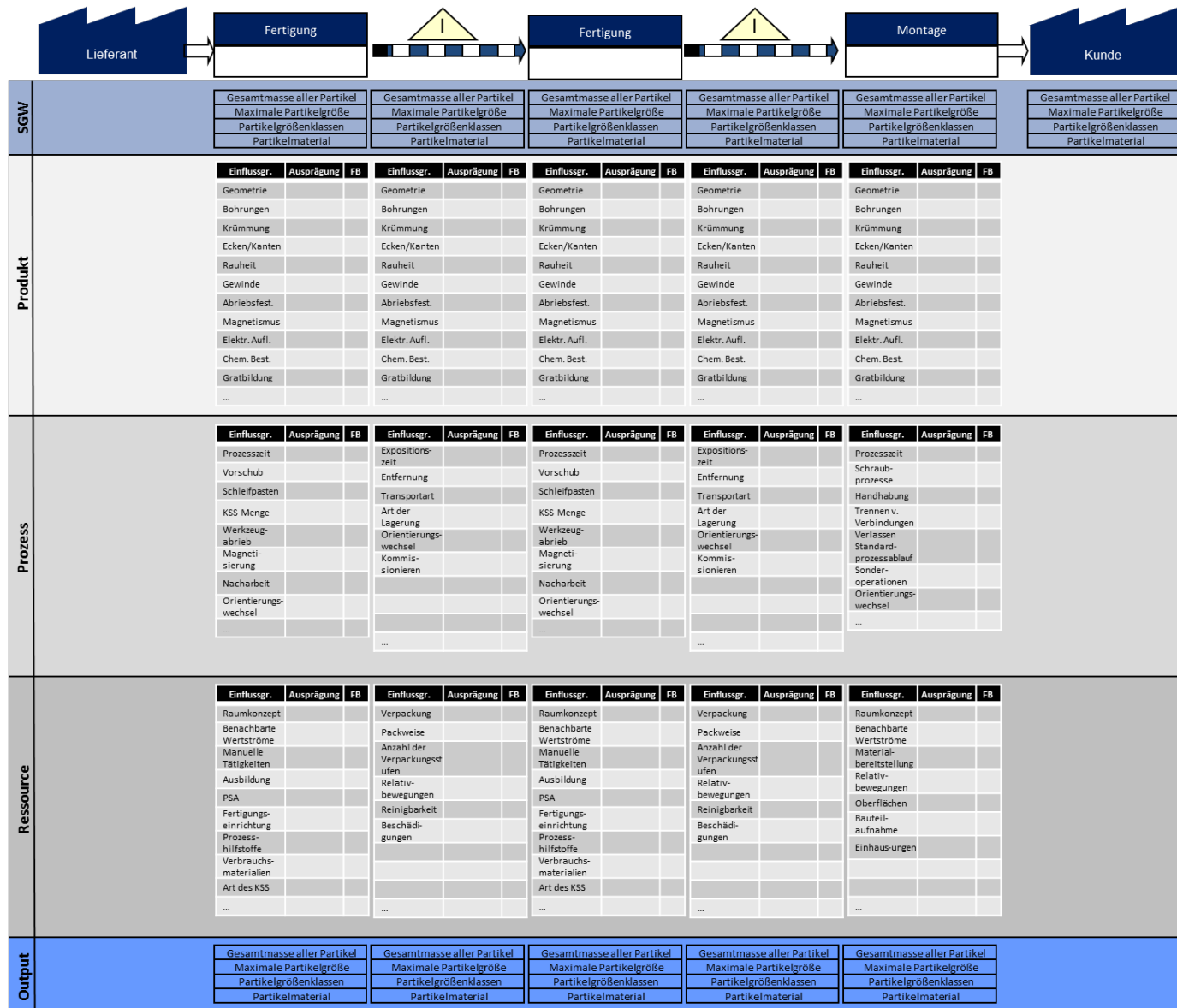


Abbildung 25: Sauberkeitsgerechte Wertstromanalyse (FB: Folgebewertung)

Risikoanalyse und Maßnahmen

Die Risikoanalyse bewertet in der klassischen FMEA nach VDA4.2 einen Fehler in Bezug auf den Endkunden. Wie in Kapitel 3 dargestellt, sind bei der Analyse sauberkeitsgerechter Materialflüsse sowohl die Anforderungen des Endkunden als auch die der Prozesse zu berücksichtigen. Die sauberkeitsgerechte Risikoanalyse ist demnach nicht einmalig für den gesamten Wertstrom mit Blick auf die Auswirkungen für den Endkunden durchzuführen, sondern für jeden Prozess im Wertstrom. Der Begriff des Kunden wird damit vom Endkunden, welcher außerhalb des Wertstroms steht, um die internen Kunden erweitert.

Im Rahmen einer adaptierten Risikoanalyse stehen zudem nicht die Fehler im Mittelpunkt der Analyse sondern das Risiko, dass ein Prozessoutput die Sauberkeitsanforderungen des Folgeprozesses nicht erfüllt. Dazu ist anhand der im Rahmen der sauberkeitsgerechten Wertstromanalyse identifizierten Einflussgrößen zu prüfen, welche Auswirkungen durch ihr Einwirken auf den Sauberkeitszustand folgen. Die zusätzliche Bewertung der Auftretens- sowie der Entdeckungswahrscheinlichkeit entsprechend der klassischen FMEA ist an dieser Stelle nicht zielführend. So werden während der Planung sauberkeitsgerechter Wertströme die Einflussfaktoren bereits in der Modellierungsphase identifiziert. Zudem ist auch bei einem unregelmäßigen Auftreten eines Einflussfaktors dessen ungünstigste Ausprägung zu berücksichtigen und durch geeignete Maßnahmen zu beherrschen. Die Risikobewertung weicht damit vom klassischen Vorgehen der FMEA ab und beschränkt sich auf die Bewertung der Folge des Einflussfaktors auf die Veränderung des Sauberkeitszustandes des Bauteils. Die Abstufung der Bewertung erfolgt dabei in Anlehnung an die Bewertung der Fehlerfolge gemäß VDA4.2 durch eine zehn Punkte Skala (1 geringe Folgebewertung; 10 hohe Folgebewertung). Mit Hilfe dieser Information lässt sich ein potentieller Prozessoutput ermitteln, anhand dessen durch den Abgleich mit den Anforderungen des Folgeprozesses, das Risiko einer Unterschreitung des geforderten Sauberkeitsniveaus bewertet wird.

Original VDMA Band 4.2 Mögliche Fehlerfolgen	Übertragung: Folge des Einflussfaktors	Bewertungspunkte
Es ist unwahrscheinlich, dass der Fehler irgendeine wahrnehmbare Auswirkung auf das Verhalten des Produktes oder Systems haben könnte; der Kunde wird den Fehler wahrscheinlich nicht bemerken.	Einflussfaktor hat keinen Einfluss auf den Verschmutzungszustand	1
Der Fehler ist unbedeutend und der Kunde wird nur geringfügig belästigt; der Kunde wird wahrscheinlich nur eine geringfügige Beeinträchtigung des Systems bemerken.	Der Einflussfaktor fördert die geringfügige Partikelsedimentation	2 bis 3
Mittelschwerer Fehler, der die Unzufriedenheit bei einigen Kunden auslöst; der Kunde wird Beeinträchtigungen des Systems bemerken.	Der Einflussfaktor führt zur Partikelsedimentation	4 bis 6
Schwerer Fehler, der den Kunden verärgert, Sicherheitsaspekte oder gesetzliche Bestimmungen sind nicht betroffen	Der Einflussfaktor führt zum Anhaften / Anziehen von Partikeln	7 bis 8
Äußerst schwerwiegender Fehler, der möglicherweise die Sicherheit und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften beeinträchtigt	Der Einflussfaktor führt zur Generierung von Partikeln	9 bis 10

Abbildung 26: Bewertungsbogen zur Folge des Einflussfaktors

Die Systemanalyse mittels der sauberkeitsgerechten Wertstromanalyse und der anschließende Bewertung der Folge des Wirkens einzelner Einflussfaktoren auf den Sauberkeitszustand nach dem Prozess, ermöglicht eine Modellierung sauberkeitsgerechter Wertströme sowie die Identifikation sauberkeitskritischer Prozesse durch einen Abgleich des potentiellen Prozessoutputs mit den Sauberkeitsanforderungen des Folgeprozesses. Dieses systematische Vorgehen ermöglicht es, bereits in der Planungsphase kritische Einflussfaktoren zu identifizieren und deren Auswirkungen zu vermindern. Dies kann durch direkte Maßnahmen erfolgen, indem anhand der Folgebewertung Hinweise auf mögliche Ansatzpunkte gegeben werden. Darüber hinaus können indirekte Maßnahmen getroffen werden, bei denen durch Veränderungen anderer Einflussfaktoren eine Kompensation des kritischen Einflussfaktors erreicht wird. Der effiziente Einsatz indirekter Maßnahmen bedingt jedoch die Kenntnis der Wechselwirkungen von Produkt-, Prozess- und Ressourceneigenschaften und die daraus resultierenden Kompensationsmöglichkeiten. Diese Wechselwirkungen der Einflussfaktoren können bis heute nur anhand von Experimenten untersucht werden. Um diese aufgrund der Vielzahl möglicher Kombinationen und Ausprägungen von Einflussfaktoren möglichst effizient zu gestalten, eignet sich die Methodik des Design of Experiments.

5.2.4 Design of Experiments (DoE)

Das Design of Experiments, im deutschen auch statistische Versuchsplanung genannt, bezeichnet die effektive Planung und anschließende Auswertung von Experimenten. Ziel des DoE ist eine effiziente, d.h. mit wenigen Versuchen durchgeführte, maximale Erkenntnisgewinnung über die Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren (Input) und Ergebnissen (Output) [Ege13] [Ban94]. Die Methodik des DoE stellt ein allgemeingültiges Vorgehen zur Gestaltung von Experimenten dar. Die in der sauberkeitsgerechten Wertstromanalyse singular aufgenommenen Einflussgrößen können durch entsprechend gestaltete Versuche in ihrem Zusammenwirken auf die Technische Sauberkeit hin untersucht werden.

Um Wertströme sauberkeitsgerecht planen zu können, werden nachfolgend die vorgestellten und angepassten Methoden in einen systemischen Leitfaden überführt.

5.3 Leitfaden zur reinheitsgerechten Gestaltung von Wertströmen

Der Leitfaden zur reinheitsgerechten Gestaltung von Wertströmen ermöglicht mit den zuvor adaptierten Methoden ein systematisches Vorgehen zur reinheitsgerechten Gestaltung von Wertströmen (vgl. Abbildung 27). Mit Hilfe dieses Leitfadens werden Unternehmen in die Lage versetzt, eigenständig Wertströme sauberkeitsgerecht zu modellieren, Sauberkeitsgrenzwerte zu definieren und durch die Identifizierung und Bewertung von Einflussfaktoren auf die Technische Sauberkeit die Veränderung des Sauberkeitsniveaus innerhalb der Materialflussoperationen zu beurteilen. Anhand des Abgleichs zwischen möglichem Prozessoutput und den Anforderungen des Folgeprozesses können sauberkeitskritische Prozesse identifiziert und Einflussfaktoren gezielt gestaltet und optimiert werden.

In der ersten Phase des Leitfadens ist dazu mit Hilfe der sauberkeitsgerechten Wertstromanalyse der gesamte Wertstrom zu modellieren. Die Ableitung der Sauberkeitsgrenzwerte für je-

den Prozess erfolgt unter Anwendung der Methodik des Quality Function Deployment sowie der individuellen technisch bedingten Prozessanforderungen. Zur Beurteilung des Prozessoutput und der damit einhergehenden Analyse der Einflussfaktoren erfolgt die Untersuchung auf Prozessebene. Dabei ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden.

Fall 1: Erzeugter Sauberkeitszustand ist bekannt

Ist der erzeugte Sauberkeitszustand bekannt, kann ein sofortiger Abgleich zwischen Prozessoutput und Anforderungen des Folgeprozesses erfolgen. Wird ein Unterschreiten des Sauberkeitsniveaus identifiziert, kann ausgehend von diesem „Top-Ereignis“ eine Analyse der Einflussfaktoren erfolgen. Der Fehlerbaum wird ausgehend davon „Top-Down“ aufgebaut und ausgewertet [Goe04]. Ist der Prozessoutput unbekannt, sind die Einflussfaktoren und das potentielle Risiko auf die Veränderung des Sauberkeitsniveaus zu untersuchen.

Fall 2: Erzeugter Sauberkeitszustand ist unbekannt

Ist der erzeugte Sauberkeitszustand unbekannt, kann durch eine Bottom-Up-Betrachtung der Einflussgrößen auf die mögliche Veränderung des Sauberkeitszustandes geschlossen werden. Dabei kommt das beschriebene Vorgehen der sauberkeitsgerechten Risikoanalyse zum Einsatz (Vgl. Kapitel 5.2.3).

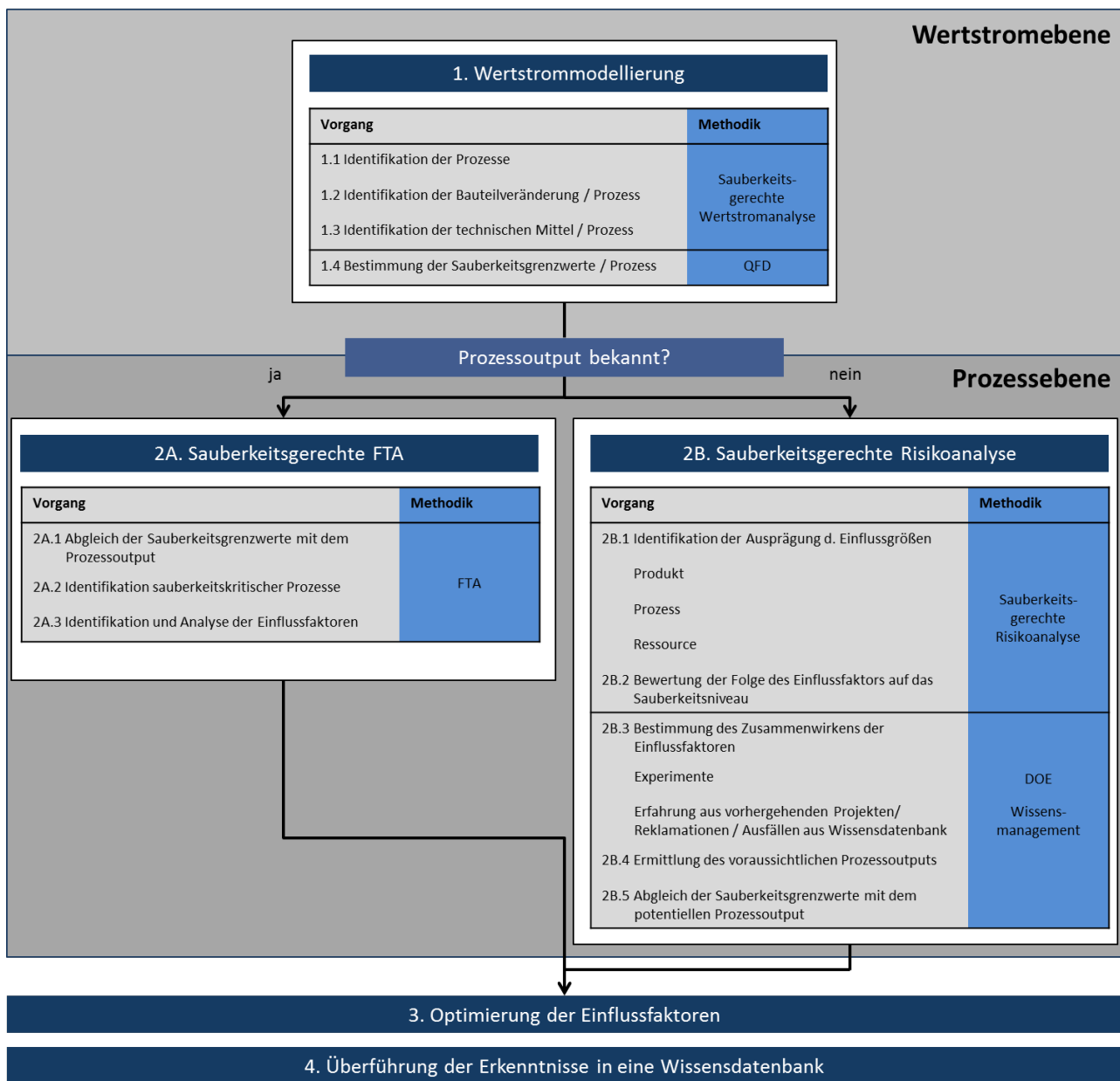


Abbildung 27: Leitfaden zur sauberkeitsgerechten Gestaltung von Wertströmen

Sind die Einflussfaktoren und deren Folge für das Sauberkeitsniveau bestimmt, ist das Zusammenwirken dieser zu untersuchen und der voraussichtliche Prozessoutput zu ermitteln. Dabei können sich einzelne Einflussfaktoren gegenseitig verstärken oder auch kompensieren. Die Kenntnis dieser Wechselwirkungen kann zum einen intuitiv auf der Erfahrung vorangegangener Projekte, Reklamationen oder Ausfälle resultieren oder ist anhand von Versuchen zu überprüfen. Durch den Abgleich von Anforderungen und Output können sauberkeitskritische Prozesse identifiziert werden.

Die dritte Phase nutzt die Erkenntnisse der Analyse der Einflussfaktoren und sowie der Versuche im Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Die Dokumentation der Erkenntnisse in Schritt 4 bildet die wesentliche Grundlage für den Aufbau einer Wissensbasis, welche die zukünftige Risikobewertung von Einflussfaktoren unterstützt.

Nachdem in Kapitel 5 Methoden des präventiven Qualitätsmanagements an die Technische Sauberkeit adaptiert und in einen Leitfaden zur sauberkeitsgerechten Gestaltung von Wertströmen implementiert wurden, werden im folgenden Kapitel repräsentative technische Mittel des Materialfluss und deren Wechselwirkungen exemplarisch untersucht.

6 Untersuchung repräsentativer technischer Mittel des Materialflusses

Wie im Verlauf dieser Arbeit deutlich wurde, ist im Rahmen der Planung und Gestaltung sauberkeitsgerechter Wertströme derzeit lediglich eine Beschreibung singulärer Einflussgrößen möglich. Das Zusammenwirken mehrerer Einflussfaktoren kann, wie im Leitfaden beschrieben, nur experimentell erfolgen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Kapitels die Untersuchung des Zusammenwirkens von mehreren Einflussfaktoren exemplarisch dargestellt. Als Versuchsumgebung dient dabei die Fertigung eines mittelständischen Herstellers der Investitionsgüterindustrie. Ziel der Untersuchungen ist die quantitative Bewertung des Einflusses verschiedener Verpackungsarten innerhalb verschiedener Lagerumgebungen auf die Sauberkeit von Bauteilen. Im Folgenden werden die während der Experimente wirkenden Einflussfaktoren identifiziert und vorgestellt.

6.1 Identifikation und Bewertung der Einflussgrößen

6.1.1 Produktbezogene Einflussgrößen

Um eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch nicht quantifizierbare produktinduzierte Einflussgrößen sowie durch die indirekte Restschmutzanalyse auszuschließen, wurden als Probekörper Partikelfallen eingesetzt. Wie in Kapitel 2.6.1 dargestellt, bringen Partikelfallen den Vorteil mit sich, dass durch das Klebeepad sedimentierte Partikel fixiert werden und der gesamte Partikeleintrag bis zur Auswertung erhalten bleibt. Ferner kann die Oberfläche direkt nach [VDA19] mit Hilfe eines Lichtmikroskops analysiert und ausgewertet werden, sodass Messfehler durch Extraktion, Filterung und Trocknung ausgeschlossen werden können. Zur Veranschaulichung ist der Aufbau der verwendeten Partikelfalle in Abbildung 28 dargestellt.

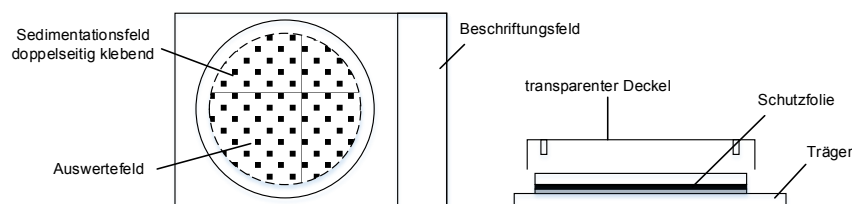


Abbildung 28: Schematischer Aufbau einer Partikelfalle [VDA19.2]

6.1.2 Prozessbezogene Einflussgrößen

Im Rahmen der Experimente wird die Materialflussoperation Lagern betrachtet. Da zudem die Probekörper und Verpackungen gehandhabt werden, sind die potentiellen Einflüsse beider Faktoren zu betrachten.

- **Lagern**

Im Rahmen der Experimente wird die Veränderung des Sauberkeitsniveaus des Probekörpers während der Materialflussoperation Lagern betrachtet. Dazu wird die Partikelfalle in unterschiedlichen Verpackungsarten im Zeitraum von 1 Woche den Einflussfaktoren der Umwelt

ausgesetzt. Durch die Betrachtung der statischen Lagerung konnte im Vergleich zu einer dynamischen Lagerung die durch die Ressourcen induzierten Einflussfaktoren in einem hohen Maße konstant gehalten werden.

- **Handhaben**

Durch das Handhaben der Behälter bzw. der Deckel können zusätzliche Verschmutzungen in die Verpackung bzw. auf die Partikelfalle eingebracht werden. Während der Versuche wurde bei geöffneter Partikelfalle die Orientierung der Verpackungen respektive der Deckel nicht verändert. Lediglich nach Beendigung des Versuchs mussten die Behälter und Deckel gehandhabt werden, was jedoch unter besonderer Vorsicht geschah, sodass das Handhaben der Verpackungen im Rahmen der Versuchsauswertung vernachlässigt werden kann. Das Lösen von Partikeln von Oberflächen während der Manipulation kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

6.1.3 Ressourcenbezogene Einflussfaktoren

- **Verpackung**

Im Rahmen der Versuche wurden vier verschiedene Arten der Verpackung untersucht. Die Ausprägungen der untersuchten Verpackungen werden in der morphologischen Analyse in den Abbildung 29 bis Abbildung 32 dargestellt. In den nachfolgend erläuterten Experimenten wird dabei insbesondere die Anzahl der Schutzstufen des Verpackungskonzepts fokussiert. So wird ein halbverschlossener Karton, ein offener Kleinladungsträger (KLT), ein mit einem Deckel verschlossener KLT sowie die Rückverschmutzung innerhalb eines VCI-Beutels in einem geschlossenen KLT untersucht.

Die in den morphologischen Kästen dargestellten Verpackungseigenschaften differenzieren zudem die Verpackungskonzepte und bilden gleichzeitig die Grundlage für eine weiterführende Untersuchung der Auswirkung einzelner Verpackungseigenschaften.

Nach [DIN00] ist der KLT ein nach oben geöffneter, dauerhafter, wieder verwendbarer, starrer, rechteckiger Modulkörper, der manuell und/oder mechanisch gehandhabt werden kann. Der Kleinladungsträger nach VDA ist dabei der in der Automobilindustrie am häufigsten verbreitete Kleinladungsträger und stellt damit ein repräsentatives Versuchsobjekt dar. Dadurch können die erlangten Ergebnisse auf einen großen Teil der industriellen Fertigung übertragen werden. Der KLT ist zudem durch einen innenliegenden Deckel verschließbar, welcher die Schale der Primärverpackung schließt und das Bauteil vor Partikelsedimentation von oben schützt.

Als Einwegverpackung wird in der industriellen Fertigung eine große Bandbreite von Kartons verwendet. Kartons unterscheiden sich im Wesentlichen zum Mehrwegbehälter KLT durch ihre Wandung (Material, Rauheit) und im vorliegenden Fall durch die Art des Verschlusses.

Als weitere Verpackungsstufe können innerhalb von Verpackungen VCI-Beutel zum Einsatz kommen, welche im Wesentlichen das Bauteil vor Korrosion schützen. Diese bilden eine weitere Verpackungsstufe und übernehmen in diesem Fall die Funktion der Primärverpackungen. Die Verpackungsarten prägen sich in der morphologischen Analyse wie folgt aus.

	Merkmal	Ausprägung KLT (offen)										
	Größe	Kleinladungsträger						Großladungsträger				
	Teileberührender Packstoff	Pappe	Holzwerkstoff			Aluminium			Kunststoff		Vollholz	Stahl
	Form	Rund			Quadratisch				Rechteckig			
	Wandung	Hinterschnittig	Keine Wandung			Durchbrochen		Strukturiert	Gedämmt		Dicht	
	Funktion	Tragend			Umschließend				Abschließend			
	Öffnungen	Eine			Zwei				Mehrfach			
	Verschluss	Kein			Teilweise				Vollständig			
	Wiederverwendbarkeit	Einweg						Mehrweg				
	Unterfahrbarkeit	nicht unterfahrbar			2-Wege unterfahrbar				4-Wege unterfahrbar			
Fördervorbereitung	Vertikal	Keine	Rollenbahnfähiger Boden			Rollen		Bodenroller		Öffnungen für Gabel		
	Horizontal	Keine			Griffmulden			Ösen		Öffnungen für Gabel		
Nestbarkeit	Komprimierbarkeit	Ja						Nein				
	Leergut	Ja						Nein				
	Vollgut	Ja						Nein				
Lagen im Behälter	Vertikal	Eins		Zwei			Drei		Mehrere			
	Horizontal	Eins		Zwei			Drei		Mehrere			
Beständigkeit	Korrosion	Ja						Nein				
	Entflammbarkeit	Ja						Nein				
	Chemisch	Ja						Nein				
	ESD	Ja						Nein				
IP-Schutzklasse	Schutz gegen Fremdkörper	keine	1 (50µm)	2 (12,5µm)	3 (2,5µm)	4 (1µm)	5 (staubgeschützt)	6 (staubdicht)				
	Schutz gegen Wasser	keine	1	2	3	4	5	6	7	8	9K	
	Informationsträger	Kein		Beschriftung			Karte Außen		Karte Innen		Aufkleber	

Abbildung 29: Morphologische Analyse KLT (offen)

	Merkmal	Ausprägung KLT mit Deckel										
	Größe	Kleinladungsträger						Großladungsträger				
	Teileberührender Packstoff	Pappe	Holzwerkstoff			Aluminium			Kunststoff		Vollholz	Stahl
	Form	Rund			Quadratisch				Rechteckig			
	Wandung	Hinterschnittig	Keine Wandung			Durchbrochen		Strukturiert	Gedämmt		Dicht	
	Funktion	Tragend			Umschließend				Abschließend			
	Öffnungen	Eine			Zwei				Mehrfach			
	Verschluss	Kein			Teilweise				Vollständig			
	Wiederverwendbarkeit	Einweg						Mehrweg				
	Unterfahrbarkeit	nicht unterfahrbar			2-Wege unterfahrbar				4-Wege unterfahrbar			
Fördervorbereitung	Vertikal	Keine	Rollenbahnfähiger Boden			Rollen		Bodenroller		Öffnungen für Gabel		
	Horizontal	Keine			Griffmulden			Ösen		Öffnungen für Gabel		
Nestbarkeit	Komprimierbarkeit	Ja						Nein				
	Leergut	Ja						Nein				
	Vollgut	Ja						Nein				
Lagen im Behälter	Vertikal	Eins		Zwei			Drei		Mehrere			
	Horizontal	Eins		Zwei			Drei		Mehrere			
Beständigkeit	Korrosion	Ja						Nein				
	Entflammbarkeit	Ja						Nein				
	Chemisch	Ja						Nein				
	ESD	Ja						Nein				
IP-Schutzklasse	Schutz gegen Fremdkörper	keine	1 (50µm)	2 (12,5µm)	3 (2,5µm)	4 (1µm)	5 (staubgeschützt)	6 (staubdicht)				
	Schutz gegen Wasser	keine	1	2	3	4	5	6	7	8	9K	
	Informationsträger	Kein		Beschriftung			Karte Außen		Karte Innen		Aufkleber	

Abbildung 30: Morphologische Analyse KLT mit Deckel

	Merkmal	Ausprägung Karton									
	Größe	Kleinladungsträger					Großladungsträger				
	Teileberührender Packstoff	Pappe	Holzwerkstoff		Aluminium		Kunststoff		Vollholz	Stahl	
	Form	Rund			Quadratisch			Rechteckig			
	Wandung	Hinterschnittig	Keine Wandung		Durchbrochen		Strukturiert	Gedämmt		Dicht	
	Funktion	Tragend		Umschließend				Abschließend			
	Öffnungen	Eine		Zwei				Mehrfach			
	Verschluss	Kein		Teilweise				Vollständig			
	Wiederverwendbarkeit	Einweg					Mehrweg				
	Unterfahrbarkeit	nicht unterfahrbar			2-Wege unterfahrbar			4-Wege unterfahrbar			
Fördervorbereitung	Vertikal	Keine	Rollenbahnfähiger Boden		Rollen		Bodenroller		Öffnungen für Gabel		
	Horizontal	Keine		Griffmulden		Ösen		Öffnungen für Gabel			
	Komprimierbarkeit	Ja					Nein				
Nestbarkeit	Leergut	Ja					Nein				
	Vollgut	Ja					Nein				
Lagen im Behälter	Vertikal	Eins		Zwei		Drei		Mehrere			
	Horizontal	Eins		Zwei		Drei		Mehrere			
Beständigkeit	Korrosion	Ja					Nein				
	Entflammbarkeit	Ja					Nein				
	Chemisch	Ja					Nein				
	ESD	Ja					Nein				
IP-Schutzklasse	Schutz gegen Fremdkörper	keine	1 (50µm)	2 (12,5µm)	3 (2,5µm)	4 (1µm)	5 (staubgeschützt)	6 (staubdicht)			
	Schutz gegen Wasser	keine	1	2	3	4	5	6	7	8	9K
	Informationsträger	Kein		Beschriftung		Karte Außen		Karte Innen		Aufkleber	

Abbildung 31: Morphologische Analyse Karton

	Merkmal	Ausprägung VCI-Beutel									
	Größe	Kleinladungsträger					Großladungsträger				
	Teileberührender Packstoff	Pappe	Holzwerkstoff		Aluminium		Kunststoff		Vollholz	Stahl	
	Form	Rund			Quadratisch			Rechteckig			
	Wandung	Hinterschnittig	Keine Wandung		Durchbrochen		Strukturiert	Gedämmt		Dicht	
	Funktion	Tragend		Umschließend				Abschließend			
	Öffnungen	Eine		Zwei				Mehrfach			
	Verschluss	Kein		Teilweise				Vollständig			
	Wiederverwendbarkeit	Einweg					Mehrweg				
	Unterfahrbarkeit	nicht unterfahrbar			2-Wege unterfahrbar			4-Wege unterfahrbar			
Fördervorbereitung	Vertikal	Keine	Rollenbahnfähiger Boden		Rollen		Bodenroller		Öffnungen für Gabel		
	Horizontal	Keine		Griffmulden		Ösen		Öffnungen für Gabel			
	Komprimierbarkeit	Ja					Nein				
Nestbarkeit	Leergut	Ja					Nein				
	Vollgut	Ja					Nein				
Lagen im Behälter	Vertikal	Eins		Zwei		Drei		Mehrere			
	Horizontal	Eins		Zwei		Drei		Mehrere			
Beständigkeit	Korrosion	Ja					Nein				
	Entflammbarkeit	Ja					Nein				
	Chemisch	Ja					Nein				
	ESD	Ja					Nein				
IP-Schutzklasse	Schutz gegen Fremdkörper	keine	1 (50µm)	2 (12,5µm)	3 (2,5µm)	4 (1µm)	5 (staubgeschützt)	6 (staubdicht)			
	Schutz gegen Wasser	keine	1	2	3	4	5	6	7	8	9K
	Informationsträger	Kein		Beschriftung		Karte Außen		Karte Innen		Aufkleber	

Abbildung 32: Morphologische Analyse VCI-Beutel

- **Raumkonzept**

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung der vorgestellten Verpackungsarten werden drei unterschiedliche Standorte gewählt. Die dort identifizierbaren Einflussgrößen der Umgebung werden nachfolgend dargestellt und beschrieben.

Lagerort 1: Automatisches Kleinteilelager (AKL)

Die erste Versuchsumgebung bildet ein Automatisches Kleinteilelager, welches im 1-Schicht-Betrieb genutzt wird.

Tabelle 8: Zusammenfassung der an Lagerort 1 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Beschreibung	Bewertung der Folge des Einflussfaktors
Zugangstor	<ul style="list-style-type: none"> • bei An-/Ablieferungsprozessen geöffnet → Partikeleintrag durch die Außenluft → Hohe Luftzirkulation durch Zugluft und dadurch luftgetragene Verschleppung von Verunreinigungen 	6
Lüftungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verwirbelung die Luft 	8
Fahrwege	<ul style="list-style-type: none"> • Augenscheinlich verschmutzte Fahrwege 	9
Tor zur Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Tor steht zeitweise offen durch unmittelbare Nähe zum Produktionsbereich besteht die Gefahr des Partikeleintrags durch Luftzug oder Fördermittel 	6

Lagerort 2: Montagenahes Lager

Bei dem zweiten untersuchten Lagerort handelt es sich um einen Lagerplatz innerhalb des Produktionsbereiches. An diesem Ort werden Kleinteile gelagert, welche während der Montage in das Endprodukt eingesetzt werden. Innerhalb des 3 m vom untersuchten Lagerort entfernten Montagebereichs werden sowohl Metall-, als auch Kunststoffkomponenten montiert. Durch die Untersuchung dieses Lagerortes soll der Einfluss der angrenzenden Materialflusseroperation „Montage“ untersucht werden. Eine nähere Betrachtung der Einflussfaktoren erfolgt in Tabelle 9.

Tabelle 9: Zusammenfassung der an Lagerort 2 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Beschreibung	Bewertung der Folge des Einflussfaktors
Zugangstor	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangstor steht offen 	6
Lüftungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verwirbelung die Luft 	8
Montageplätze	<ul style="list-style-type: none"> • Metall- und Kunststoffverarbeitung (Gewindeschneiden, Senken, Bohren, Schrauben, Druckluftreinigung) 	9

Vormontage im benachbarten Bereich	<ul style="list-style-type: none"> Zuschneiden und Ausstanzen von Pappe 	9
Lackiererei	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitung (Reinigung, Trocknung, Lackierung) von 1100 Teilen täglich 	9
Fahrwege	<ul style="list-style-type: none"> Augenscheinlich verschmutzte Fahrwege 	9
Mülltonnen	<ul style="list-style-type: none"> Regelmäßige Öffnung sowie regelmäßiges Einschütten von Restmüll und aufgefegtem Staub führt zu starker Verschmutzung des Umfeldes 	10

Lagerort 3: Fertigungsnahes Lager

Lagerort 3 befindet sich im Fertigungsbereich. Pro Woche werden an drei Arbeitsplätzen ca. 80 Endprodukte im 1-Schicht-Betrieb gefertigt. Ein wesentlicher Einfluss geht von den 3,50 m entfernten Handarbeitsplätzen aus, an denen neben Metall auch Kunststoff bearbeitet wird. Folgende Tabelle fasst die auftretenden Verunreinigungsquellen in der Umgebung des Lagerortes C zusammen.

Tabelle 10: Zusammenfassung der an Lagerort 3 auftretenden ressourcenbezogenen Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Beschreibung	Bewertung der Folge des Einflussfaktors
Türen	<ul style="list-style-type: none"> Tür steht offen und fördert Durchzug 	7
Lüftungen	<ul style="list-style-type: none"> Verwirbelung die Luft 	8
Montageplätze	<ul style="list-style-type: none"> Zuschneiden und Ausstanzen von Pappe bei der Vormontage (erzeugt leichte, flugfähige Partikel) Metall und Kunststoffverarbeitung (Bohren, Schrauben, Nieten) 	9
Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> Druckluftreinigung 	
Fahrwege	<ul style="list-style-type: none"> Augenscheinlich verschmutzte Fahrwege 	9

6.2 Experimentelle Bestimmung des Zusammenwirkens der Einflussgrößen

Das Ziel der nachfolgend erläuterten Versuchsreihen besteht im Einzelnen darin, durch die Variation von Verpackungen in unterschiedlichen Lagerumgebungen Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren der Verpackung sowie der Umwelt auf die Technische Sauberkeit zu untersuchen. Ferner erfolgt eine Klassifizierung der Verpackungsarten hinsichtlich Verpackungsaufwand und tatsächlicher Schutz des Testkörpers vor Rückverschmutzungen.

6.2.1 Versuchsplan

Der Versuchsplan umfasst drei Versuchsreihen, in denen vollfaktorielle Versuche durchgeführt wurden. Das heißt jede Ausprägung der untersuchten Verpackungsarten wurde an allen drei

beschriebenen Lagerorten den dort identifizierten Einflussgrößen ausgesetzt. Tabelle 11 fasst den Versuchsplan einer Versuchsreihe tabellarisch zusammen.

Tabelle 11: Vollfaktorieller Versuchsplan der experimentellen Untersuchung

#	Lagerort	Verpackungsart
01	1	KLT m. Deckel
02	2	KLT m. Deckel
03	3	KLT m. Deckel
04	1	VCI-Beutel in KLT m. Deckel
05	2	VCI-Beutel in KLT m. Deckel
06	3	VCI-Beutel in KLT m. Deckel
07	1	KLT offen
08	2	KLT offen
09	3	KLT offen
10	1	Karton
11	2	Karton
12	3	Karton

Bevor die Ergebnisse der Versuchsreihen dargestellt werden, soll zunächst auf die Beschreibung der Versuchsdurchführung eingegangen werden.

6.2.2 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Nachdem die zu untersuchenden Verpackungsarten sowie die Einflussfaktoren der Lagerumgebung identifiziert und bewertet wurden, erfolgt in diesem Kapitel die Beschreibung der Versuchsdurchführung.

Vor jedem Versuch wurden die Mehrwegverpackungen gereinigt bzw. die Einwegverpackung gegen unbenutzte ausgetauscht. Anschließend erfolgte das Auslegen der Partikelfallen und der Verpackungen in den jeweiligen Lagerbereichen. Die Expositionsdauer der untersuchten Verpackungen betrug dabei 1 Woche. In dieser Woche wirkten die beschriebenen Einflussgrößen auf den Sauberkeitszustand des Bauteils ein. Nach der Entnahme der Partikelfallen wurden diese bis zur lichtoptischen Analyse nach VDA19 verschlossen. Die Auswertung und Analyse erfolgte außerhalb der Versuchsumgebung im Restschmutzanalyselabor. Den Versuchsablauf zeigt Abbildung 33.

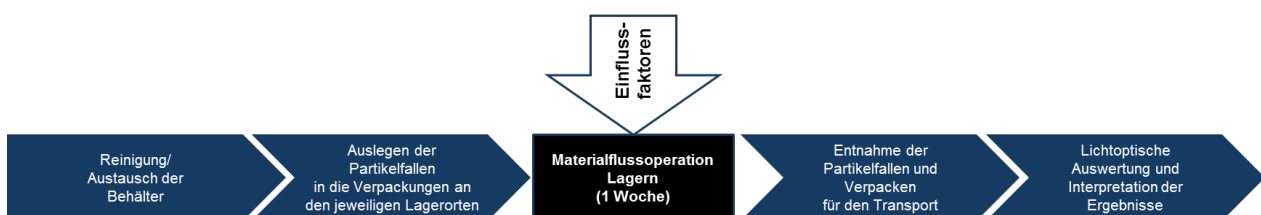


Abbildung 33: Versuchsablauf unter Verwendung von Partikelfallen als Testbauteil

Im anschließenden Kapitel erfolgt die statistische Auswertung der während der drei Messreihen ermittelten Daten.

6.2.3 Statistische Auswertung der gesammelten Daten

Im Anschluss an die lichtoptische Analyse, deren Ergebnis die Partikelgrößenverteilung sowie die Einteilung der Partikel in metallische und nicht-metallische Partikel sowie Fasern darstellt, erfolgt die statistische Auswertung der Messdaten anhand der Varianzanalyse. Die Varianzanalyse findet Anwendung bei einer metrisch, quantitativ ausgeprägten Zielgröße, wie bspw. die Anzahl der Partikel und nominalen qualitativen Einflussgrößen [Bra10]. Mit Hilfe der Varianzanalyse kann das Einflussgewicht einer Einflussgröße auf eine Zielgröße bestimmt werden. Die Berechnung der Zielgröße aus der gemessenen Partikelgrößenverteilung erfolgt nach dem Berechnungsschema des Illig-Werts (vgl. Kapitel 2.6.1).

Die aus den drei durchgeführten Versuchsreihen gemittelten Illig-Werte aufgetragen über die Verpackungsarten und die Lagerorte zeigen, dass der KLT ohne Deckel in allen drei untersuchten Lagerumgebungen den höchsten Grad der Rückverschmutzung hervorruft (Abbildung 34).

Tabelle 12: Übersicht der gemittelten Illig-Werte (Testbauteil: Partikelfalle)

	KLT m. Deckel	VCI-Beutel in KLT	KLT offen	Karton	Summe	Mittelwert	Varianz	Standard-abweichung
Lagerort 1	17,9	21,2	450,6	45,8	535,4	133,8	38396,2	196,0
Lagerort 2	37,2	21,3	645,6	91,7	795,7	198,9	80958,9	284,5
Lagerort 3	16,1	12,1	853,6	36,7	918,5	229,6	147212,8	383,7
Summe	71,2	54,6	1949,7	174,1				
Mittelwert	23,7	18,2	649,9	58,0				
Varianz	633,2	98,2	48935,7	2371,3				
Standard-abweichung	25,2	9,9	221,2	48,7				

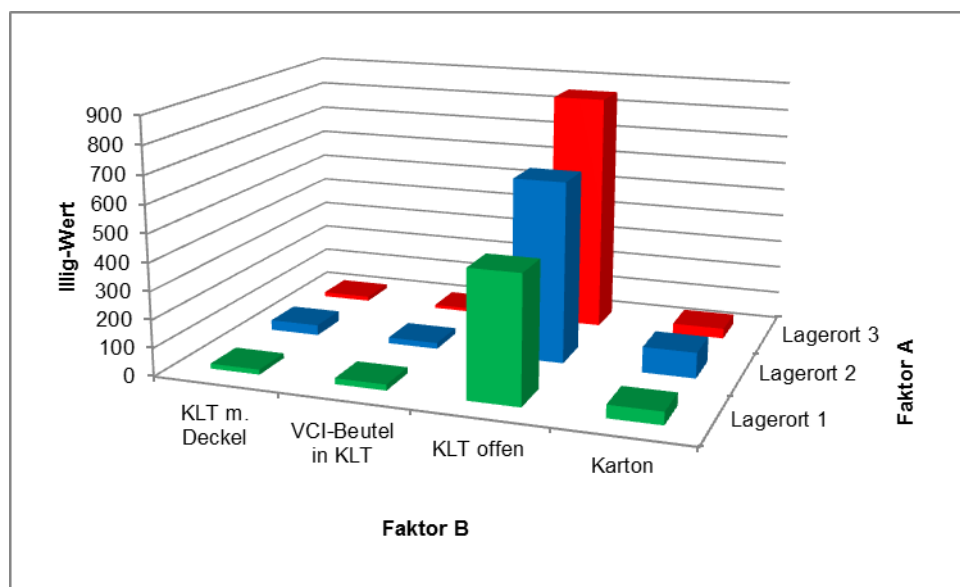


Abbildung 34: Diagramm der gemittelten Illig-Werte je Faktorstufenkombination

Während die Verpackungskonzepte mit einer geschlossenen Primärverpackung (Deckel, VCI-Folie, Karton) geringe Rückverschmutzungen in allen untersuchten Lagerumgebungen auf-

weisen, ist das Testbauteil im offenen KLT der Verschmutzung schutzlos ausgesetzt. Die ermittelte Rückverschmutzung im offenen KLT ist ca. 20mal höher als die Rückverschmutzung der Partikelfalle in den geschlossenen Primärverpackungen. Ferner sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen, geschlossenen Primärverpackungen hinsichtlich der Rückverschmutzung festzustellen.

Die Betrachtung der Größenverteilung aller gemessenen Partikel bezüglich des Lagerortes (Abbildung 35 bis Abbildung 38) zeigen die insbesondere schlechte Schutzfunktion des offenen KLT gegenüber Partikeln < 600 µm. Die verminderte Erfassung von Partikeln > 600 µm lässt sich auf deren Flugeigenschaften zurückführen (Vgl. Abbildung 6). Bei allen verwendeten Behältern ist ein seitlicher Schutz der Partikelfalle vor aufgewirbelten Partikeln gegeben. Somit haben ausschließlich senkrecht herabfallende Partikel Einfluss auf das Versuchsergebnis.

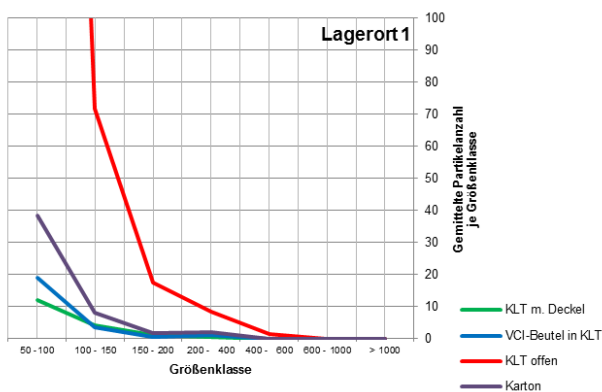


Abbildung 35: Partikel/Größenklasse (Lagerort 1)

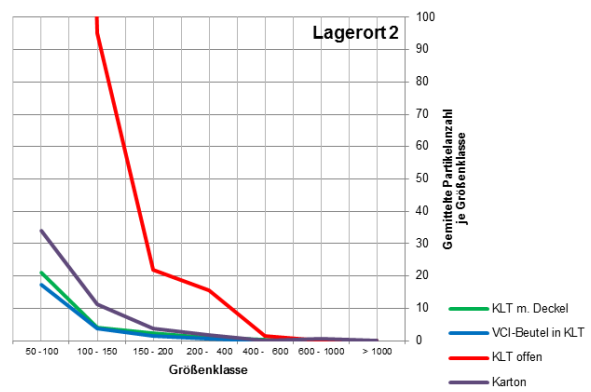


Abbildung 36: Partikel/Größenklasse (Lagerort 2)

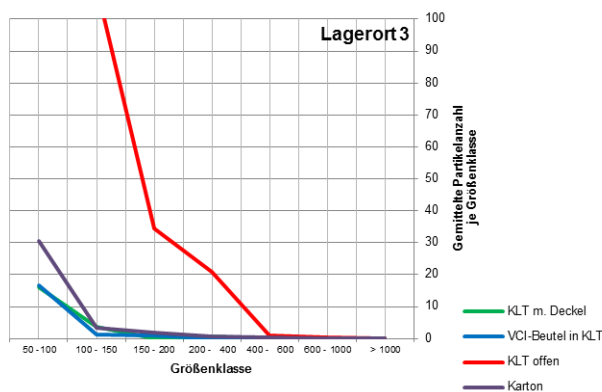


Abbildung 37: Partikel/Größenklasse (Lagerort 3)

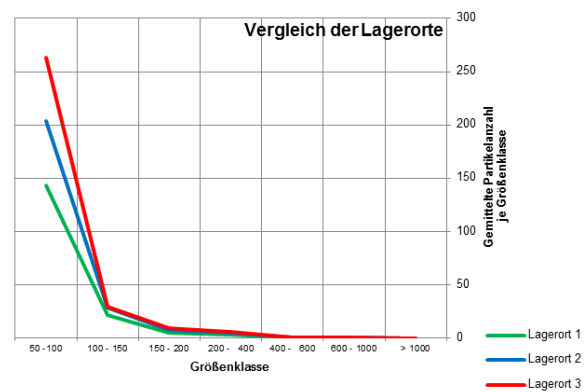


Abbildung 38: Partikel/Größenklasse/Lagerort

Eine Korrelation zwischen dem Grad der Abdeckung des Probekörpers und der entstehenden Rückverschmutzung wird anhand der Abbildung 35 bis Abbildung 38 leicht ersichtlich. Jedoch ist die Differenz der Rückverschmutzungen zwischen dem Grad der Abdeckung der Probenoberfläche bemerkenswert. In den Versuchen zeigt sich, dass eine Rückverschmutzung durch Partikel > 200 µm bereits bei einer nicht vollständig dichten Primärverpackung weitestgehend vermieden werden kann. Deutliche Unterschiede zwischen der Verpackung im Karton und der

vollkommen luftdichten Verpackung im VCI-Beutel zeigen sich erst bei Partikelgrößen < 100 µm. Weiterhin ist eine Signifikanz der unterschiedlichen Ausprägungen der Einflussfaktoren an den jeweiligen Lagerorten im Größenbereich > 200 µm nicht abzuleiten. Das lässt darauf schließen, dass die Verpackung den wesentlichen Einflussfaktor darstellt. Abbildung 39 und Abbildung 40 stützen diese Erkenntnis und zeigen anhand der über die drei Versuchsreihen gemittelten Illig-Werte, dass bei einer geschlossenen Primärverpackung der Einfluss des Lagerortes sehr gering ist.

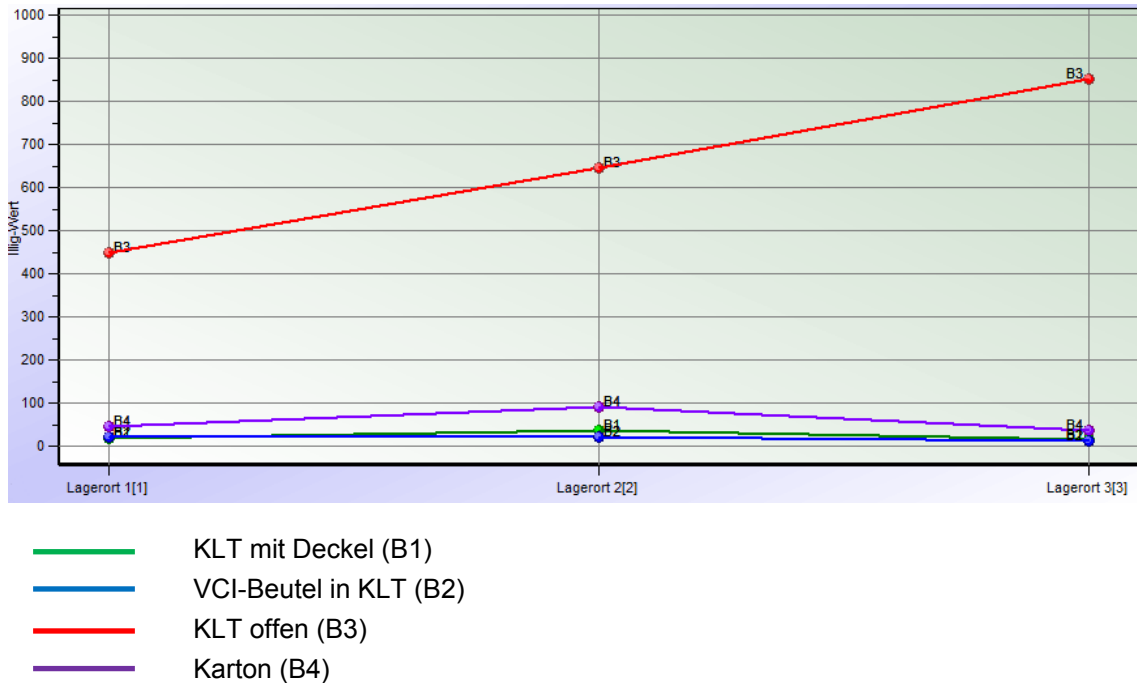


Abbildung 39: Auswirkungen des Lagerorts (alle Partikel)

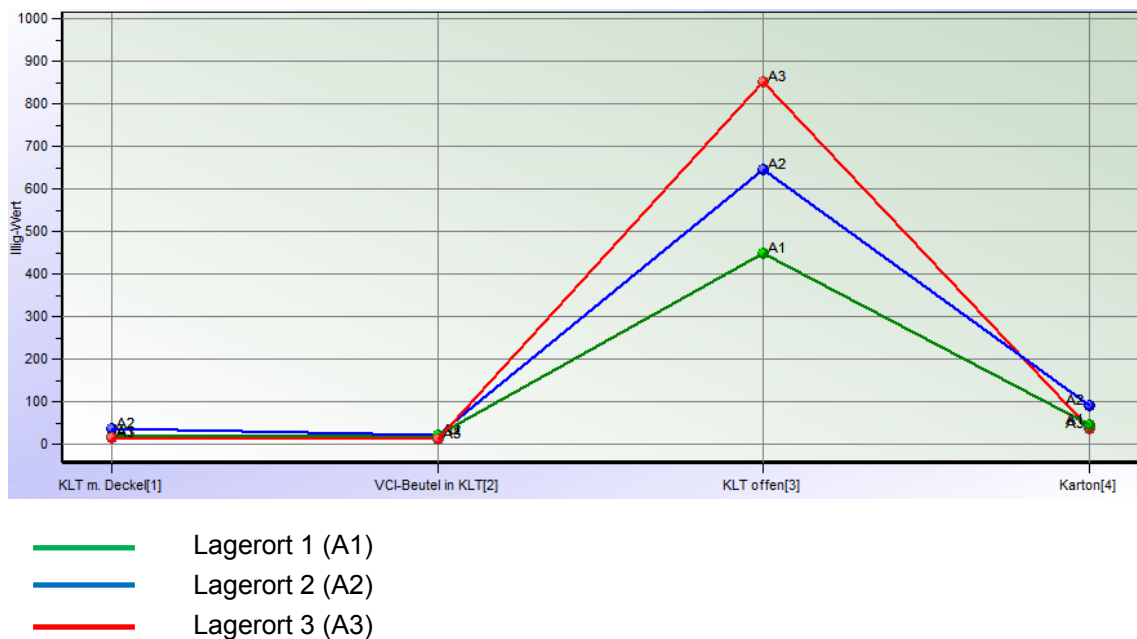


Abbildung 40: Auswirkungen der Verpackungsart (alle Partikel)

Die singuläre Betrachtung der Lagerorte zeigt, dass statisch gelagerte Bauteile im offenen Behälter an Lagerort 1 am wenigsten rückverschmutzt werden. Diese Tendenz verstärkt sich zunehmend bei der reinen Betrachtung von metallischen Partikeln. An Lagerort 3 ist in der offenen Primärverpackung eine ca. 3mal so hohe Partikelsedimentation metallischer Partikel nachzuweisen als am Lagerort 1 (Abbildung 41).

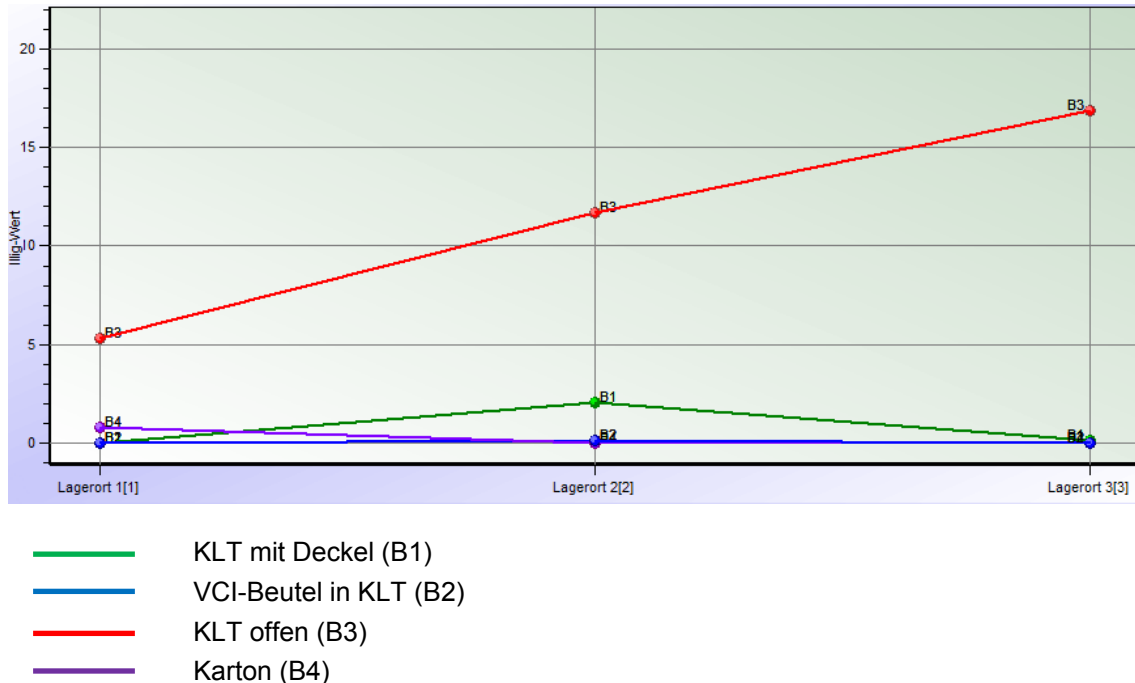


Abbildung 41: Auswirkung des Lagerorts (metallische Partikel)

Dies lässt sich auf die identifizierten Einflüsse der Umgebung der Lagerorte sowie die Flugeigenschaften von metallischen Partikeln zurückführen. Da in der Umgebung von Lagerort 1 (AKL) keinerlei Fertigungsschritte stattfinden, können metallische Partikel nur durch Verschleppung oder Abrieb an die gelagerten Testbauteile gelangen. Das Risiko ist dabei deutlich niedriger, als an Standorten, die in unmittelbarer Nähe zu Montage oder Fertigungsprozessen lokalisiert sind.

Aus der Betrachtung der Verpackungsarten lässt sich resümieren, dass ein KLT mit einer Kombination aus Deckel und VCI-Beutel minimal besser als ein KLT mit Deckel ohne VCI-Beutel vor Rückverschmutzungen schützt. Ohne VCI-Beutel besteht jedoch das Risiko, dass durch das Handling des Deckels zusätzliche Partikel auf das Bauteil gelangen. Dieser Einflussfaktor stellt einen Ansatz dar, um das schlechtere Ergebnis des KLT mit Deckel im Vergleich zum Karton am Lagerort 2 (Abbildung 41) zu erklären.

In Summe schützt der Karton geringfügig schlechter als ein KLT mit Deckel vor Rückverschmutzungen. Das höchste Rückverschmutzungsrisiko weist der offene KLT auf. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die Art der Primärverpackungen einen wesentlichen Einfluss auf die Veränderung des Sauberkeitszustands innerhalb der Materialflussoperation Lagern darstellt. Innerhalb der Beschreibung der Verpackungsarten ist der Faktor „Verschluss“ von deutlich

höherer Relevanz als bspw. das Material, für den Fall, dass keine Relativbewegung zwischen Probekörper und Verpackunginnenseite zu beobachten ist.

7 Zusammenfassung

Die Reinheitsanforderungen an industriell gefertigte Bauteile haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Durch die Entwicklung immer filigraner Bauteile mit hochwertigen Oberflächen steigt die Notwendigkeit, selbst kleinste Verunreinigungen prozesssicher von der Bauteiloberfläche zu entfernen und diesen Zustand entlang der Materialflussoperationen des Wertstroms aufrecht zu erhalten. Ziel des Forschungsprojektes war somit die Entwicklung eines Leitfadens zur Überprüfung und Planung der innerbetrieblichen Materialflussoperationen im Hinblick auf die technische Bauteilsauberkeit. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise bei der Modellierung der Wertströme, der Klassifizierung repräsentativer technischer Mittel des Materialflusses sowie die Identifikation und Bewertung der hierbei auftretenden sauberkeitsrelevanten Einflüsse.

Hierzu wurden in Kapitel zwei und drei zunächst die Grundlagen für die weitergehenden Betrachtungen gelegt. Der Fokus lag dabei auf den Herausforderungen und Anforderungen an die technischen Mittel des Materialflusses zur Erhaltung der Bauteilsauberkeit bei Materialflussoperationen sowie auf deren systemischer Betrachtung. Basierend auf einer umfassenden Recherche und Gesprächen mit Experten aus der Industrie konnte die Bedeutung des Themenfeldes der Technischen Sauberkeit sowie deren Relevanz für produzierende Unternehmen umfassend aufgezeigt und dargestellt werden. Der systemische Ansatz zur Betrachtung sauberkeitsgerechter Wertströme bietet die Grundlage Materialflussoperationen systematisch aufzunehmen und zu modellieren. Dabei wurden verschiedene Ansätze der Systemtheorie auf deren Übertragbarkeit auf die Erfordernisse der Technischen Sauberkeit hin untersucht. Durch die Betrachtung der Systemelemente und deren Wechselwirkungen, kann die Hypothese abgeleitet werden, dass jeder Prozess einen Einfluss auf die Technische Sauberkeit nehmen kann.

Aufbauend auf dem systemischen Ansatz in Kapitel drei erfolgt in Kapitel vier die Ermittlung und Systematisierung singulärer Einflussfaktoren und Möglichkeiten der Rückverschmutzung von gereinigten Bauteilen entlang des Wertstroms. Diese Untersuchung bildet die Datengrundlage für eine systematische Risikobewertung von Wertströmen. Die Analyse zeigte die Vielfältigkeit von Materialflussoperationen sowie die zahlreichen technischen Mittel, die für diese eingesetzt werden können. Darüber hinaus konnten zahlreiche Möglichkeiten der Rückverschmutzung von gereinigten Bauteilen entlang des Wertstroms ermittelt und systematisiert werden. Dies führt zu einer Vielzahl an unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen und Einflüssen auf die Sauberkeit von Bauteilen, welche in Wechselwirkung zueinander stehen.

Zur vereinfachten Integration der Projektergebnisse in bestehende Planungsprozesse der Unternehmen wurden in Kapitel fünf etablierte Methoden des Qualitätsmanagements auf die Belange der Technischen Sauberkeit adaptiert und in einen Leitfaden zur Modellierung und Analyse sauberkeitsgerechter Wertströme implementiert. Insbesondere KMU werden durch den entwickelten Leitfaden befähigt, ihre Prozesse mit den dortigen spezifischen Sauberkeitsanforderungen eigenständig und systematisch zu gestalten. Aspekte von der Festlegung der

Sauberkeitsgrenzwerte, über die Identifikation sauberkeitsrelevanter Einflussgröße bis zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen sind in dem Leitfaden adressiert.

Abschließend erfolgt in Kapitel sechs eine Untersuchung der Wechselwirkungen der identifizierten Einflussgrößen anhand repräsentativer Mittel des Materialflusses während der statischen Lagerung. Die Versuche zielten darauf ab, Wechselwirkungen zwischen Einflussfaktoren zu quantifizieren und hinsichtlich ihres Aufwand-Nutzen-Verhältnisses zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass das Konzept der Primärverpackung im Vergleich zu den Einflüssen der Umwelt den Haupteinflussfaktor darstellt. Befindet sich das Bauteil während der statischen Lagerung in einer geschlossenen Primärverpackung, ist die Betrachtung der Einflussfaktoren der Umwelt von untergeordneter Bedeutung. Ob ein direkter Schutz des Bauteils grundsätzlich die geeignete Herangehensweise ist, gilt es in weiteren Versuchen zu betrachten.

Durch den erarbeiteten Leitfaden zur reinheitsgerechten Gestaltung von Materialflüssen entlang des Wertstroms konnte der Stand der Technik erweitert werden. So schafft die systemische Betrachtung der Einflüsse auf das Sauberkeitsniveau sowie die Adaption bestehender Modellierungsmethoden und Ansätze des Qualitätsmanagements die Grundlage für eine sauberkeitsgerechte Gestaltung von Materialflüssen und stellt insbesondere für KMU eine hilfreiche Unterstützung dar.

Zudem lässt sich resümieren, dass der präventive Ansatz des Qualitätsmanagements ebenso auf die Technische Sauberkeit übertragen werden kann. Um effektiv Rückverschmutzungen zu vermeiden und damit einhergehend die Zahl der Reinigungsprozesse zu minimieren, kann durch eine systemische Betrachtung und Modellierung die Basis für eine wissenschaftliche Analyse und Ermittlung der Veränderung des Sauberkeitsniveaus geboten werden. Dazu ist eine Betrachtung der Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen erforderlich, welche im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch nicht vollständig untersucht werden konnten. Der im Forschungsvorhaben entwickelte Leitfaden eröffnet dennoch die Möglichkeit, bestehende Materialflüsse hinsichtlich der Bauteilsauberkeit zu untersuchen und individuelle Handlungsempfehlungen für die Um- oder Neugestaltung von reinheitsorientierten Materialflussoperationen abzuleiten. Zum Aufbau der im Leitfaden dargestellten Wissensbasis ist jedoch eine weiterführende Analyse der Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen erforderlich. Ist diese Wissensbasis vorhanden, können bereits in der Planung von Wertströmen gezielt Maßnahmen eingeleitet werden, welche die Anzahl an Reinigungsprozessen vermindern und damit einen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und zum Umweltschutz mit sich bringen. Das Ziel des Vorhabens wurde durch die zuvor aufgezeigten Ergebnisse erreicht.

8 Anhang A

8.1 Leitfragen zu möglichen Rückverschmutzungsmöglichkeiten in Fertigungsprozessen

Merkmal	ja	nein
Können Späne oder metallische Partikel entstehen?		
Werden KSS verwendet?		
Kommen Schleifpasten zum Einsatz?		
Können Schweißperlen entstehen?		
Ist die Bildung von Schlacke möglich?		
Werden Strahlmittel eingesetzt?		
Kann Werkzeugabrieb entstehen?		
Wird das Teil magnetisiert?		
Was das Teil statisch aufgeladen?		
Sammeln sich Partikel im Arbeitsraum?		
Kommt das Bauteil mit dem Personal in Kontakt?		
Kann es zur Nacharbeit kommen?		
Wird das Bauteil in seiner Orientierung verändert?		
...		

Anhand dieser Leitfragen ist zu prüfen, welche auf den jeweiligen Fertigungsprozess zutreffen. Durch eine Analyse von Fehlerbildern ähnlicher Produkte und den Einsatz der in Kapitel 2.6.1 vorgestellten Analyseverfahren können Rückschlüsse auf Partikelquellen geschlossen und die Leitfragen entsprechend ergänzt werden.

9 Literaturverzeichnis

- [Ama95] Amanpour A. et al. Reinigung mit Kohlenwasserstoffen und Wasser, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1995.
- [Arn04] Arnold, D.; Isemann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.: Handbuch Logistik. 2. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg, 2004.
- [Aur06] Aurich, J. C.: SpanSauber. Ergebnisbericht der Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von zerspanenden hergestellten Bauteilen. Forschungs- und Entwicklungsprojekt, gefördert vom BMBF und betreut vom PTKA. Kaiserslautern, 2006.
- [Aur09] Aurich, J.; Fallenstein, F.; Eyrisch T.; Hielscher T.: Bauteilreinigung im Spritzverfahren. Einfluss von Reinigungs- und Lagerungszeit sowie Magnetismus auf das Ergebnis bei der Spritzreinigung zerspanend hergestellter Bauteile. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 9, S.775-779.
- [Ban94] Bandemer, H.; Bellmann, A.: Mathematik - für Ingenieure und Naturwissenschaftler - Statistische Versuchsplanung. 4. Auflage, Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig, 1994.
- [Bec92] Becker, J.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation als CIM-Baustein. In: Männel W. (Hrsg.). Handbuch Kostenrechnung 1992.
- [Bil09] Bilz, M.; Krieg, M.: Sauberkeit effizient planen. Methodisches Handeln in der Reinigungstechnik. JOT Special Industrielle Teilereinigung, (2009) 1, S. 7-9.
- [Bil13] Bilz, M.; Motschmann, J.; Mankiewicz: Markt- und Trendanalyse in der industriellen Teilereinigung 2012, Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik, Berlin 2013.
- [Ble11] Bleisch, G.; Majschak, P.D.J.P.; Weiß, U. (2011): Verpackungstechnische Prozesse: Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie: Behr's Verlag DE.
- [Bop97] Bopp, R. (1997): Design for X-Methoden, in: Forschungs- und Entwicklungsmanagement, Hrsg. von: Bullinger, H.-J./Warschat, J., Teubner, Stuttgart, 1997, S. 195–203.
- [Bre12] Bremer, P.; Brüggemann, H.: Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012
- [Bru01] Brunn, K.: Modulare wässrige Reinigungssysteme - Einsatz in verschiedenen Anwendungsgebieten. 2001.
- [Bru04] Brunner, F.; Wagner, K.: Taschenbuch Qualitätsmanagement. Leitfaden für Ingenieure und Techniker. 3. Aufl., München: Hanser Verlag, 2004, S. 163.
- [Bür13] Bürkle, E.; Karlinger P.; Wobbe H.: Reinraumtechnik in der Spritzgießverarbeitung Carl Hanser Verlag München 2013.
- [Dai10] Daiber, T.: Teilereinigung mit wässrigen Medien. Schritt für Schritt weniger Energie. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2010) 4, S.92-95.
- [Dai04] Daimler DBL 6515: Bestimmung der Technischen Sauberkeit von Bauteilen. 2004.
- [Deu07] Deuse, J.; Stausberg, J.; Wischniewski, S.: Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007) 5, S. 291-294.

- [Deu08b] Deuse, J.; Döhner, K.; Droste, M.: Environmental and Economic Benefits of Vibration Cleaning. In: Conference Proceedings of the 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. 17.-19. März 2008, Sydney, Australien, S. 634-639.
- [Deu08a] Deuse, J.; Krebs, M.; Droste, M.; Döhner, K.: Bauteilreinigung im Wertstrom. In: ZWF- Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 9, S. 598-601.
- [Deu14] Deuse, J. et al: Industrial Engineering – Produktionssysteme verstehen und Gestalten, Springer Verlag, tbd.
- [DSV13] Deutscher Schraubenverband e.V.: Richtlinie Prüfung der Technischen Sauberkeit von Schrauben und Muttern für die Automobilindustrie, o.O., 2013.
- [DIN81] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1981) Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag.
- [DIN89] DIN 30781-1 1989.
- [DIN01] DIN EN ISO 14644-4:2001: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche. Teil 4: Planung, Ausführung und Erstinbetriebnahme (ISO 14644-1 : 2001).
- [DIN05a] DIN EN ISO 9000, 2005.
- [DIN05b] DIN EN ISO 9001:2005.
- [DIN06] DIN ISO 16232 Teil 10 2006.
- [DIN00] DIN EN 13199-1:2000.
- [DIN8580] DIN 8580:2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- [Dre08] Drechsel D.; Vetter F.: Wäge-, Abfüll- und Verpackungsprozesse, 2. Auflage, Oldenburg, München 2008.
- [Dro13] Droste, M.: Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage, Diss. TU Dortmund 2013.
- [Dur06] Durkee, J.: Management of Industrial Cleaning Technology and Processes. Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2006.
- [Ege13] Eggert, C.: Lineare statistische Modellierung und Interpretation in der Praxis, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2013.
- [Erl07] Erlach, K.: Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [Ern07] Ernst, C.; Rochowicz, M.: Partikelschmutz trotz sauberer Bauteile. Journal für Oberflächentechnik, 3 (2007), S. 48-51.
- [Esc07] Eschke, R. : Technische Verpackungslogistik: Auslegung von Verpackungen für den globalen Versand: Expert Verlag, 2007.
- [Eur04] European Hygienic Engineering and Design Group: Gestaltungskriterien für hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten, 2. Auflage, Frankfurt 2004.
- [FiT05] Fachverband industrielle Teilereinigung e.V.: Teilereinigung wird zum wertschöpfenden Fertigungsschritt. Partikel-Verunreinigungen erstmals qualifiziert. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2005) 12, S. 16.
- [Fra07] Fraunhofer Allianz Reinigungstechnik: Markt- und Trendanalyse in der industriellen Reinigungstechnik. Berlin. Fraunhofer IPK, 2007.

- [Fre09] Fryer, P.J.; Asteriadou K.: A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning processes, in: Trends in Food Science & Technology 20 (2009) 255-262.
- [Gai02] Gail, L.; Hortig, H-P.: Reinraumtechnik. Springer Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, 2002, S. 69.
- [Goe04] Goebels, S.; Jakob, R.: Geschäftsprozess-FMEA: Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse für IT-gestützte Geschäftsprozesse: Symposium Verlag, Düsseldorf 2004.
- [Gol02] Goldschmidt, A.; Streitberger, H. J.: BASF-Handbuch Lackiertechnik: Vincentz Verlag, Hannover 2002.
- [Gom98] Gommel, U.: Grundlagen der Reinraumtechnik und Personalverhalten - Trends in der reinen Produktion. In: Fertigungstechnik im Reinraum - Messtechnisches Praktikum. Stuttgart: Fraunhofer IPA, 1998.
- [Gro14] Grossmann, A.: Steigende Reinheitsanforderungen, Konsequenzen für die Produktion aus Sicht eines Herstellers. Forum Messe parts2clean, 28. Oktober 2003, Friedrichshafen.
- [Gro03] Grossmann, A.: Von der Lichtmikroskopie zur Computertomographie, Stuttgart 2014.
- [Haa96] Haase, B.: Bauteilreinigung. Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen. Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen. 1. Aufl., Malsheim: expert-Verlag, 1996.
- [Haa97] Haase, B.: "Wie sauber muß eine Oberfläche sein?", JOT, 37 (4), 52 (1997).
- [Har01] Harrington, J.: Industrial Cleaning Technology. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [Hau12] Hauser, G.: Hygienische Produktionstechnologie: Wiley, 2012.
- [Hei11a] Heisel, U.; Schaal, M.; Sabou, F.: Bauteilsauberkeit beim Einlippentiefbohren. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011)1-2, S. 36-40.
- [Hei11b] Heiserich, O.-E.; Helbig, K.; Ullmann, W.: Logistik. 4. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Hen14] Heneka, B.E.: Techn. Sauberkeit & Partikelanalyse, Stuttgart 2014.
- [Hil02] Hiltl, Marion: Reinigung im Fertigungstakt. In: JOT (2002), Nr. 7, S. 34-36.
- [Hol12] Holzapfel, Y.; Kreck, G.: Reinheitsvalidierung von kontaminationskritischen Produkten. contamination control report, 2 (2012), S. 15-21.
- [Hor06] Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe, Springer Verlag, Berlin 2008.
- [Hor12] Hortig, H.-P. (Hrsg.); Gail, L.; Gommel, U.: Reinraumtechnik. 3., aktualisierte u. erw. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York 2012.
- [Hor99] Hornemann, M.; Modrich, K.-U.; Schmierer, G.: Reinigung als Kostenfaktor in Produktion und Dienstleistung. In: wt - Werkstattstechnik 89 (1999) 4, S. 171-172.
- [Hua96] Huang, G. Q.: Design for X: Concurrent Engineering Imperatives: Springer Netherlands, 1996.

- [Hum13] Hummel, T.; Malorny, C.: Total Quality Management (TQM). In: Kamiske, G. F. (Hrsg.): Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. 2. Aufl., S. 1-48, Carl Hanser, München, 2013.
- [Ill13] Illig H.: Messen, Überwachen und Einstellen der Umgebungssauberkeit in der Automobilindustrie, 4. Fachtagung Technische Sauberkeit, Mannheim 2013.
- [Jel99] Jelinek, T.: Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie. Saulgau, Eugen G. Leuze Verlag, 1999.
- [Joh07a] Johansson, I.; Somasundaran, P.: Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces. Volume 1, Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2007.
- [Joh07b] Johansson, I.; Somasundaran, P.: Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces. Volume 2, Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2007.
- [Jon00] Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Dissertation, Technische Universität München, 2000.
- [Jun10] Jung B., Wappis J.: Taschenbuch Null-Fehler-Management - Umsetzung von Six Sigma, Hanser 2010, S. 156ff.
- [Jün00] Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflußsysteme. 2. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg, 2000.
- [Jün99] Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflusssysteme. Systemtechnische Grundlagen. 2. Aufl., Berlin: Springer Verlag, 1999.
- [Kan01] Kanegsberg, B.: Handbook for Critical Cleaning. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2001.
- [Kaß14] Kaßmann, M.: Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [Kel12] Keller, M.: Contamination Control Für Life-Science Anwendungen. Lounges 2012: Vortragssession Contamination Control, Karlsruhe 2012.
- [Klo03] Kloke, U.: Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2003.
- [Kob13] Koblenzer, G.: Zentrale und dezentrale Lösungen Bottleneck vs. Invest – Reinigungskonzepte im Vergleich, in: JOT 8/2013.
- [Koe12] Koether, R.: Distributionslogistik. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Koh08] Kohli, R; Mittal K. L.: Developments in Surface Contamination and Cleaning. Norwich: William Andrew, 2008.
- [Kön14] König-Birk, J. Die richtige Analyseverfahren für filmische und partikuläre Verschmutzungen finden, Stuttgart 2014.
- [Kra14] Krause, A.: Anforderungen an die Technische Sauberkeit, 5.Fachtagung Technische Sauberkeit, Stuttgart 2014.
- [Kre09a] Krebs, M.; Schmitz, L.; Deuse, J.: Sustainable cleaning of parts. In: Quaderni della XIV Summer School "Francesco Turco" Impianti Industriali Meccanici: "Sustainable Development: The Role of Industrial Engineering", 15.-19.9.2009, Porto Giardino, Italy, S. IV.139-IV.145.
- [Kre09b] Krebs, M.; Deuse, J.: Parts cleaning in the value stream. In: Proceedings of 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, München 2009, S. 800-809.

- [Kre10a] Krebs, M.; Deuse, J.: Resource efficient and economic parts cleaning – Requirements oriented cleaning saves resources, energy and money. In: Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA '10), 3.-5.2.2010, Stellenbosch, South Africa, S. 165-170.
- [Kre10b] Krebs M.; Oeken, N: Entwicklung eines Vibrationsreinigungsverfahrens für die industrielle, ressourcenschonende Bauteilreinigung (ViReBa), Schlussbericht, Dortmund 2010.
- [Küm07] Kümmel, W.: Technische Strömungsmechanik: Theorie und Praxis: Vieweg+Teubner Verlag. 3. Auflage, Wiesbaden 2007.
- [Lot12] Lotter, B.; Wiendahl, H. P.: Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis. Springer Verlag, Berlin 2012.
- LPW 2012: Fett- und ölfrei ist nicht genug, in: Modulare Bauteilreinigung Jahrg. 66 (2012) 5.
- [Mar04] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. 5. Aufl., Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [Mar08] Martin, H.; Römisch, P.; Weidlich, A.: Materialflusstechnik. 9. Aufl., Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [Mau12] [Mauermann, M.: Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immergierten Systemen der Lebensmittelindustrie, Diss. TU Dresden 2012.
- [Mey10] Meyna, A.; Pauli, B. Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik; Quantitative Bewertungsverfahren. Hanser, München, Wien, 2010.
- [MIL94] MIL-STD-1246C (Military Standard, Product Cleanlinesslevels and Contamination Control Program, 1994.
- [Pet97] Petterson, D.: Practical Guide to Industrial Metal Cleaning. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1997.
- [Pfe13] Pfeffer, P.; Harrer M.: Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Auflage, Springer Wiesbaden 2013.
- [Pfe94] Pfeifer, T.; Hollmann F.: Innovative Qualitätssicherung in der Produktion. 1. Aufl., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [Pfe01] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2001.
- [Pil10] Piller, T. & Wadle, M., Hochdruck-Wasserstrahltechnik steigert Sauberkeit bei Motorteilen. *Maschinen Markt*, 15 Dezember, 2010.
- [Ram00] Ramstorp, M., Introduction to Contamination Control and Cleanroom Technology. s.l.:Wiley-VCH Verlag Gmb, 2000.
- [REF11] REFA-Lexikon - Industrial Engineering und Arbeitsorganisation (2011). 3. Aufl. München: Hanser.
- [Ric09] Richard, T.: Entwicklung eines internetbasierten Wissensmanagementsystems für die reinigungsgerechte Konstruktion. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2009.
- [Ric14] Richard, T.: Aufbau der Verschmutzung eines Bauteils; URL: http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/94/extern_cat_id/6, Einsichtnahme: 15.07.14
- [Roc04] Rochowicz, M.; Krieg, M.C.: Anforderungen der Automobilindustrie an die Reinigungstechnik in: *Metalloberfläche* : mo 58 (2004), No.5, pp.29-31.

- [Roc06] Rochowicz, M.; Ernst, C.: VDA Band 19. Technische Sauberkeit als messbares Qualitätsmerkmal. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2006) 9, S.60-63.
- [Roc08] Rochowicz, M.; Grimme, R.: Neue Aufgaben für die Reinigung. Sauberkeitstechnik im Wandel. In: JOT Spezial. Industrielle Teilereinigung (2008) 1, S. 12-14.
- [Roc09] Rochowicz, M.; Ernst, C.; Schmauz, G.: Sauber ist oft schon rein genug. Arbeiten an neuem Regelwerk kommen voran. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2009) 3, S.60-63.
- [Roc10] Rochowicz, M., 2010. Filterzentrifuge zur gravimetrischen Analyse von Partikeln in Suspensionen. s.l.:Jost-Jetter Verlag.
- [Roc11] Rochowicz, M.: Sauberkeit bringt Sicherheit – Leitfaden zur Technischen Sauberkeit von Bauteilen. QZ Qualität und Zuverlässigkeit, 56 (2011) 2, S. 26-27.
- [Roc12] Rochowicz, M.: Die VDA 19-Prüfung-wichtig aber "unfähig". JOT, 3, (2012), Seiten 50-51.
- [Roc13] Technische Sauberkeit in Produktion und Prüfung – Anwendung und Neues von VDA Band 19 und VDA Band 19 Teil 2, in: VDA QMC Expertenforum auf der IAA 2013.
- [Roc14a] Rochowicz, M: Die Überarbeitung von VDA 19 im Endspurt, 5. Fachtagung Technische Sauberkeit, Stuttgart 2014.
- [Roc14b] Rochowicz, M: Erstellung von Sauberkeitsgrenzwerten, JOT Journal für Oberflächentechnik March 2014, Volume 54, Issue 3, pp 58-61.
- [Rop12] Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie: Einführung in transdisziplinäres Denken: Edition Sigma, 2012.
- [Ros97] Rose, G.: Untersuchungen zur Reinigung bei der Feldverpackung von Frischgemüse, Dissertation, Universität Hohenheim 1997.
- [Sch14] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Sch10a] Schmauz, G.; Verfahren zur Klassifizierung von Partikeln in der Automobilindustrie mittels Lumineszenzspektroskopie. Stuttgart: Jost-Jetter Verlag, 2010.
- [Sch08] Schneider, G.; Geiger, I. K.; Scheuring, J. (2008): Prozess- und Qualitätsmanagement Compendio Bildungsmedien, Zürich 2008.
- [Sch13b] Schuh, G.; Stich, V.; Kompa, S.: Distributionslogistik. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Aufl., Seiten 115-164, Springer Vieweg, Berlin 2013.
- [Sch13a] Schuh, G.; Hering, N.; Brunner, A.: Einführung in das Logistikmanagement. In: Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Aufl., Seiten 1-34, Springer Vieweg, Berlin 2013.
- [Sch06] Schulz, D.: Wie sauber kommen Teile zum Kunden? Einfluss der Logistik auf die Reinheit von Werkstücken. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2006) 4, S. 18-19.
- [Sch09] Schulz, D.: Restschmutz aufspüren. Reinigungsergebnisse kontrollieren und dokumentieren. In: JOT – Journal für Oberflächentechnik (2009) 9, S.64-69.
- [Sch10b] Schulz, D.: Strategien gegen Partikel. Journal für Oberflächentechnik, 10 (2010), S. 46-49.

- [Sch11] Schütz A.; Triebert J.: Kontrollierte Wechselwirkungen, JOT Journal für Oberflächentechnik June 2011, Volume 51, Issue 6, pp 44-47.
- [Sin60] Sinner, H.: Über das Waschen mit Haushaltwaschmaschinen, 2. Auflage, Haus+Heim VERLAG, 1960.
- [Spa03] Spath, D.: Ganzheitlich produzieren. Innovative Organisation und Führung. Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH, 2003.
- [Ten07] Ten Hompel: Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik 2007.
- [Thi08] Thiel, K.; Meyer, H.; Fuchs, F.: MES - Grundlage der Produktion von morgen: Oldenbourg Industrieverlag, München 2008.
- [Töl09] Töllner A, Jockisch M, Holzmüller H.H.; Die Erhebung von Kundenanforderungen als Eingangsgrößen in eine QFD – Ein Methodenvergleich. QFD-Forum 26:S. 1–21, 2009.
- [Val14] Valet O.: Methoden zur Partikelidentifizierung: Analyse der Stärken und Schwächen neuer Technologie, 5. Fachtagung Technische Sauberkeit, Stuttgart 2014.
- [VDI2860] VDI 2860:1990-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
- [VDA4.2] VDA-Band 4 Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz - Produkt- und Prozess-FMEA, 2. Auflage, 2006 (Loseblattsammlung).
- [VDA19] Verband der Automobilindustrie e. V.: Prüfung der Technischen Sauberkeit. Partikelverunreinigungen funktionsrelevanter Automobilteile. 1. Aufl., Frankfurt am Main, 2004.
- [VDA19.2] Verband der Automobilindustrie e. V.: Technische Sauberkeit in der Montage Teil 2. Umgebung, Logistik, Personal und Montageeinrichtungen. 1. Aufl., Frankfurt am Main, 2010.
- [Wei05] Weinert, K.: Spanende Fertigung: Prozesse, Innovationen, Werkstoffe: Vulkan-Verlag (Bd. 10), 2005.
- [Wei08] Weißbrich, A.; Fuchsbauer, B.; Heinrichs, H.-J.; Plegniere, H.-G.: Qualitätsmanagement in der gesamten Wertschöpfungskette. ATZproduktion, 1 (2008), S. 6-12.
- [Wie09] Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen, Ein morphologischer Ansatz. In: ZWF- Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 1-2, S. 32-37.
- [Wie11] Wiendahl, H. H.: Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung: Springer, Heidelberg 2011
- [Wie12] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl, S. 331-364, Springer Vieweg, Berlin 2012.
- [Wil06] Wildbrett, G.: Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie. Behr's Verlag : Hamburg 2006.
- [Wil96] Wildemann, H.: Lean Management. Methoden, Vorgehensweisen und Wirkungsanalysen – eine empirische Studie aus 20 Unternehmen. 3. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum GmbH, 1996.
- [Wit88] Wittel, K.: Prüfung der Reinheit von Metalloberflächen. In: Kresse, J. (Herausgeber): Säuberung technischer Oberflächen -Vergleichende Bewertung", Expert-Verlag, Ehingen, 251 (1988).

-
- [Wol06] Wolff, O.: Ein Qualitätsmerkmal macht Karriere. Bauteilsauberkeit in der Automobilindustrie. In: Quality Engineering (2006) 9, S. 10-12.
- [Wul04] Wullstein, M.: Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen. Dissertation, Technische Universität Dortmund 2004.
- [ZVE14] ZVEI - Zentralverband der Elektrotechnik und Elektroindustrie e. V.: Leitfaden Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik. S. 8 - 49, Frankfurt am Main 2013.