

Schlussbericht - Kurzversion

zu IGF-Vorhaben Nr. 19110 N / 1

Thema

Wertstromübergreifende Auslegung von Bauteilreinigungskonzepten

Berichtszeitraum

01.04.2016 – 31.03.2018

Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dortmund

Institut für Produktionssysteme



Dortmund, 14.09.2018

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Zusammenfassung

Die übergreifende Zielsetzung des Forschungsvorhabens bestand in der Konzeption einer Systematik, mit deren Hilfe eine iterative Planung und Regelung sauberkeitssensibler Produktionssysteme möglich ist. Dieses Konzept umfasst dabei die datentechnische Verknüpfung der Phasen Messung und Verbesserung durch eine datengetriebene Analyse zur Ableitung zielgerichteter Vermeidungsstrategien und Bauteilreinigungskonzepte. Die übergreifende Zielsetzung wurde erreicht, indem drei Unterziele definiert und wie folgt bearbeitet wurden.

1. Erstellung einer grundlegenden Systematik zur Regelung sauberkeitssensibler Produktionssysteme, die ein datengetriebenes Vorgehen ermöglicht und KMU sowohl inhaltlich als auch praktisch zugänglich ist.
2. Entwicklung einer Analysemethodik für sauberkeitssensible Produktionssysteme, mit deren Hilfe Partikelentstehungsmechanismen und Verschleppungspfade identifiziert werden können. Diese soll gleichzeitig zur Bewertung umgesetzter Verbesserungsmaßnahmen dienen.
3. Untersuchung der Eignung verschiedener Reinigungsverfahren und deren Integration in das Fertigungslayout.

Zu 1: Die entwickelte Systematik basiert auf der Adaption des DMAIC-Regelkreises (Define /Definieren, Measure /Messen, Quantifizieren, Analyze /Analysieren, Improve /Verbessern und Control /Kontrollieren, Überwachen) [21] für den Anwendungsfall der Regelung und Gestaltung sauberkeitssensibler Produktionssysteme. Die iterative Vorgehensweise wird auch als sog. Modell eines prozessorientierten Qualitätsmanagementsystems in der IATF 16949:2016 [11] bzw. in der ISO 9001:2015 [5] aufgegriffen. Die IATF 16949:2016 legt zusammen mit zutreffenden kundenspezifischen Anforderungen sowie den Anforderungen der ISO 9001:2015 und der ISO 9000:2015 die grundlegenden Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie fest. Somit ist die iterative Vorgehensweise als Qualitätsregelkreismodell für die vorliegende Arbeit zur strukturierten Problemlösung im Qualitätsmanagement bereits etabliert [5, 27]. Besonderer Fokus liegt dabei auf der datentechnischen Verknüpfung der Phasen Messung und Verbesserung. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, die Messergebnisse bzw. die erzeugten Partikelbilder zu interpretieren, Partikelentstehungsmechanismen zu erkennen und gezielte Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten und deren Wirkung zu überwachen.

Zu 2: Der deutliche Anstieg der verfügbaren Partikelbilder, die in firmeneigenen Laboren oder in externen Laboren im Rahmen der VDA 19.1 Standardsauberkeitsanalyse erzeugt werden, birgt Potential für den Einsatz von Image Data Mining Ansätzen. Das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte, online-verfügbare Modell zur Metall/ Nichtmetall-Klassifikation von Partikeln mit Deep Learning Ansätzen zeigt sehr gute Ergebnisse. Die hohe Übereinstimmung mit den durchgeführten Prozessuntersuchungen und den

Klassifikationsergebnissen ausgewiesener Experten zeigt, dass hier eine vielversprechende und günstigere Alternative zur etablierten Methodik der VDA 19.1 entwickelt wurde. Die Architektur des Modells bietet darüber hinaus im Gegensatz zu den etablierten Messsystemen die Möglichkeit einer kontinuierlichen Adaption und Erweiterung der Datenbasis. Damit ist es möglich, auf Fehlklassifikationen zu reagieren und diese zu beseitigen. Weiterhin ist die Angabe der Konfidenz der Klassifikation (50 % „geraten“ – 100 % „sicher“) sowie die einfache Integration des Modells in bestehende Softwarestrukturen hervorzuheben. Die Klassifikation eines Bildes dauert dabei deutlich unter einer Sekunde. Aufgrund des Wegfalls des Polarisationsfilters ist zudem eine Reduzierung der Hardwarekosten zu erwarten.

Ferner wurden Prozesse und die dort entstehenden Partikel sowie deren Merkmale untersucht. Es wurde ein Partikelkatalog erarbeitet, anhand dessen Partikelbilder miteinander verglichen werden können, um kritische Prozesse entlang des Wertstroms zu identifizieren. Durch eine softwaretechnische Umsetzung können Partikelmerkmale hinsichtlich Form, Farbe und Oberflächentextur extrahiert werden. Die Ergebnisse zeigen Merkmale auf, die sich zur Unterscheidung und Katalogisierung von Partikeln eignen. Dies ist eine entscheidende Vorarbeit für eine mögliche automatisierte Klassifikation von Partikelbildern. Darüber hinaus kann der Beweis angetreten werden, dass Partikel nicht zufällig entstehen, sondern das Nebenprodukt spezifizierter Prozesse sind und sich anhand spezifischer Merkmale verschiedenen Entstehungsmechanismen zuordnen lassen.

Zudem wurde eine Modellierungsmethodik entwickelt, um Ursachen von Partikeln auf Bauteilen zu identifizieren, die aus der Bearbeitung des Produkts selbst stammen. Die Verschleppungspfade können damit visualisiert und in der Phase der Verbesserung entkoppelt werden.

Die Ergebnisse ermöglichen eine deutlich verbesserte Interpretation der Messergebnisse und weiten den Lösungsraum für Verbesserungsmaßnahmen deutlich auf, indem zusätzlich zur Reinigung eine gezielte Vermeidung ermöglicht wird.

Zu 3: Durch Expertengespräche wurden bestehende Reinigungsverfahren hinsichtlich ihrer Reinigungsqualität, ihrer Eignung für nachfolgende Prozesse, dem einsetzbaren Werkstückmaterial sowie der Verunreinigung am Bauteil bewertet. Aufgrund der mannigfaltigen Beziehungen zwischen den Reinigungsparametern sowie der möglichen vielfältigen Ausprägungen dieser einzelnen Parameter war hier keine allgemeingültige, beste Lösung zu ermitteln. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden daher exemplarisch korrelierende Parameter bei der Reinigung mit ionisierter Luft in Fließlinien am Beispiel der Fertigung mechatronischer Baugruppen aufgezeigt und eine entsprechende Vorgehensweise vorgestellt.

Darüber hinaus wurden Einflussfaktoren auf die räumliche Organisation von Reinigungsanlagen erhoben und mathematisch in Beziehung zueinander gebracht. Auch

hier ist festzustellen, dass die Ausprägung dieser Faktoren von den Zielgrößen und Rahmenbedingungen des Betreibers abhängt und aufgrund der späten und meist untergeordneten Berücksichtigung der TecSa im Produktentstehungsprozess nur sehr eingeschränkt forschungsseitig zugänglich ist.

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens wurde durch die aufgeführten Ergebnisse erreicht.

Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Buchbeiträge/Dissertationen/Internet

Die Ergebnisse des IGF-Forschungsvorhabens CLean 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.
Institut für Produktionssysteme

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

<http://www.ips.do>

Vorträge

Inhalte und Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden interessierten Vertretern der Industrie im Rahmen folgender Veranstaltungen vorgestellt:

- Zwinkau, R: Technische Sauberkeit in der Logistik, Vortrag auf dem Tag der Logistik. Schwerte, 21.04.2016
- Zwinkau, R: Wertstromübergreifende Auslegung von Bauteilreinigungskonzepten, 7. Fachkongress Technische Sauberkeit in Montage- und Produktionsprozessen, Würzburg, 10. – 11.05.2016
- Zwinkau, R: Wertstromübergreifende Auslegung von Bauteilreinigungskonzepten, Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) des IGF-Vorhaben Nr. 19110 N / 1 mit dem Titel Bauteilreinigungskonzepte effizient gestalten und bewerten. Dortmund, 15.06.2016
- Zwinkau, R: Wertstromübergreifende Auslegung von Bauteilreinigungskonzepten [CLean], Vortrag auf der Praxiszeit „Industrielle Teilereinigung“, Hattingen 28.06.2016
- Zwinkau, R: Konzept zur Analyse und Verbesserung sauberkeitssensibler Montagesysteme, Vortrag auf dem zweiten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) des IGF-Vorhaben Nr. 19110 N / 1 mit dem Titel Sauberkeitssensible Montagesysteme analysieren und zielgerichtet verbessern. Dortmund, 13.07.2017
- Zwinkau, R: Analyse sauberkeitssensibler Produktionssysteme mit Image Data Mining, Vortrag auf dem dritten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) des IGF-Vorhaben Nr. 19110 N / 1 mit dem Titel Sauberkeitssensible Montagesysteme analysieren und zielgerichtet verbessern. Dortmund, 21.02.2018

Beiträge in Zeitschriften

- Zwinkau, R., Müller P.,
Deuse, J. Untersuchung korrelierender Parameter bei der Reinigung mit
ionisierter Luft in Fließlinien am Beispiel der Fertigung
mechatronischer Baugruppen, Journal für Oberflächentechnik,
Oktober 2017, Volume 57, Issue 11, S. 62–65
- Zwinkau, R., Möhle R.,
Frentrup S., Deuse, J. Metall/ Nichtmetall- Klassifikation von Partikeln mit Deep Learning,
Journal für Oberflächentechnik, Oktober 2018; Volume 58, Issue
10, i.V.

Inhaltverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Veröffentlichungen	5
Abbildungsverzeichnis.....	2
1. Stellenwert der Technischen Sauberkeit.....	3
1.1 Arbeitshypothese, Zielstellung und Forschungsschwerpunkt	4
2. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse	6
2.1 AP 1: Anforderungsanalyse an eine Systematik zur Gestaltung von Reinigungskonzepten	6
2.2 AP 2: Identifikation und Charakterisierung von Reinigungsfällen	7
2.2.1 TAP 2.1: Identifikation und quantitative Beschreibung von Reinigungsfällen.....	7
2.3 AP 3: Bewertung und Auswahl von Reinigungsverfahren und -anlagen.....	11
2.3.1 TAP 3.1: Quantitative Bewertung der Eignung von Reinigungsverfahren und - anlagen	12
2.3.2 TAP 3.2: Formalisierung des Anfrage- und Angebotsprozesses.....	13
2.4 AP 4: Beschreibung und Modellierung der räumlichen Organisationsform.....	17
2.5 AP 5: Sauberkeitsgerechte Materialflussgestaltung und -bewertung.....	18
2.6 AP 6: Gesamtsystematik zur Gestaltung und Bewertung von Reinigungskonzepten	18
3. Literatur.....	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansatz zur Modellierung von Verschleppungspfaden an einem exemplarischen Beispiel.....	9
Abbildung 2: Bewertung der Umgebungssauberkeit anhand statistischer Kennzahlen	11
Abbildung 3: TecSa-Elemente im PEP bei Bosch und Audi [35].....	13
Abbildung 4: Regelkreis der Technischen Sauberkeit auf Wertstromebene	19
Abbildung 5: Primär- und Sekundärumgebung eines Bauteils am Beispiel einer Maschineneinhausung	21

1. Stellenwert der Technischen Sauberkeit

Einhergehend mit der Entwicklung immer kleinerer und leistungsfähigerer Baugruppen und Komponenten im Maschinenbau sowie in der Automobil- und Elektronikindustrie, hat sich das Qualitätsmerkmal „Technische Sauberkeit“ (TecSa) in der industriellen Fertigung und Montage zu einer erforderlichen Leistungsanforderung entwickelt [7, 30]. TecSa lässt sich allgemein als „die Abwesenheit kritischer unerwünschter Materie“ definieren, welche sich negativ auf die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Komponente oder des Gesamtsystems auswirken kann [1, 12, 16]. Abhängig vom technischen System können jedoch selbst Verschmutzungen von wenigen 100 µm Größe zu einer Erhöhung der Verschleiß- und der Korrosionsanfälligkeit oder zum kompletten Ausfall führen [2, 18, 23, 29]. Darüber hinaus führen Verschmutzungen zu Prozessfehlern wie bspw. einer Herabsetzung der Qualität von Schweiß- oder Klebestellen in der Montage [26]. Dies bedeutet, dass es bei der Einhaltung der TecSa sowohl um die Aufrechterhaltung eines störungsfreien und sicheren Produktionsprozesses als auch um die Gewährleistung der Funktionalität der Bauteile, der Baugruppen oder auch ganzer technischer Systeme geht [10].

Aus der branchenspezifischen Vielfalt von sauberkeitssensiblen Anwendungen und Prozessen können sich unterschiedliche Reinheitsanforderungen mit Blick auf die kritische Verschmutzungsart, -menge, -größe und -härte ergeben [17]. In den genannten Branchen sind im Wesentlichen partikuläre und filmische Verschmutzungen sowie Fasern relevant, da sich diese im Gegensatz zu bspw. biologischen Verschmutzungen negativ auswirken können [32, 33, 39]. In der industriellen Herstellung mechatronischer Baugruppen und Halbleiter sind besonders partikuläre Verschmutzungen von Bedeutung, da sie für über 50 % der Ausfälle verantwortlich sind [14, 39]. Ferner steigt in elektronischen oder mechatronischen Systemen das Risiko von Kurzschlüssen deutlich an [39]. Aus diesem Grund werden heute nahezu alle fluid- und stromführenden Komponenten in der Automobil- und Elektronikindustrie mit Sauberkeitsgrenzwerten belegt [4, 6, 9, 30, 36]. Zudem werden Partikel im Bereich von einigen hundert Mikrometern auch nach dem Technologiewandel in der Automobilindustrie hin zu Elektrofahrzeugen mit Batterien oder Brennstoffzelle in Kombination mit einer Leistungselektronik funktionskritisch sein [24].

Im Rahmen der Forschungsarbeiten werden partikuläre metallische und nicht metallische Verunreinigungen $\geq 200 \mu\text{m}$ fokussiert. Für diese werden eindeutige Grenzwerte definiert, da sie in technischen Systemen der Automobil- und Elektronikindustrie sowie im Maschinenbau zu Initialschäden führen können [22]. Unternehmen stehen zunehmend in der Verantwortung, ihre Baugruppen und Komponenten unter erhöhten Anforderungen an das Qualitätsmerkmal TecSa zu konstruieren, zu fertigen, zu montieren und zu distribuieren [8, 34]. Hierfür sind die Ergebnisse der meist kostenintensiven Sauberkeitsanalysen besser zu nutzen, um zielgerichtete Verbesserungen ableiten und regeln zu können. Dazu sind die limitierten Möglichkeiten der Analyse von einer Risikobewertung und -minimierung hin zu einer Interpretation der erzeugten Mess-Daten, vor allem der Partikelbilder, weiterzuentwickeln. Im vorliegenden Fall sind nach Rochowicz [25] wesentliche Informationen vor allem in den aufgenommenen Bildern der nachweisbaren Partikel enthalten. Diese können jedoch aufgrund fehlender softwareseitiger Unterstützung und Expertise nicht ausgewertet und hinsichtlich korrelierender Partikelentstehungsmechanismen interpretiert werden.

Die zunehmende Integration neuer Produkte in bestehende Linien, die steigende Bedeutung der TecSa sowie die Tatsache, dass die Entstehung von Verschmutzungen nicht umfassend und wirtschaftlich vermieden werden kann, führt zu der Erfordernis sauberkeitssensible Produktionssysteme zielgerichtet zu analysieren und zu verbessern [28]. Dazu ist eine datenbasierte Analyse und kontinuierliche Verbesserung sauberkeitssensibler Arbeitssysteme erforderlich.

Das Erzeugen von Komponenten, die den Sauberkeitsgrenzwerten entsprechen, wird vielfach gleichgesetzt mit der Bauteilreinigung und eher als notwendiges Übel denn als wertschöpfender Prozess betrachtet [23, 31, 38]. Durch zunehmend kundenseitig induzierte Sauberkeitsgrenzwerte ist die Erzeugung der Technischen Sauberkeit jedoch mittlerweile ein fester Bestandteil der Wertschöpfungskette.

Neben der Bauteilreinigung steht entsprechend der Definition von „technisch sauber“ zusätzlich die Optionen des Vermeidens und des Tolerierens von Verschmutzungen zur Verfügung [40]. Während durch die Bauteilreinigung kritische Verschmutzungen aktiv von der Bauteiloberfläche entfernt werden, kann durch entsprechende Maßnahmen die Entstehung oder das Verschleppen von Verschmutzungen auf kritischen Oberflächen vermieden werden. Ferner kann durch das Aufweiten der Sauberkeitsgrenzwerte, bspw. durch eine robustere Konstruktion, ein Bauteil bei gleichen Rahmenbedingungen als technisch sauber bewertet werden. Die Aufgabe bei der Gestaltung sauberkeitssensibler Produktionssysteme besteht darin, diese drei grundsätzlichen Optionen aufeinander abzustimmen, sodass die Erzeugung der Technischen Sauberkeit durch zielgerichtete Maßnahmen kostenminimiert dargestellt werden kann.

1.1 Arbeitshypothese, Zielstellung und Forschungsschwerpunkt

Die Bearbeitung und letztendlich Lösung der Problemstellung fußt auf verschiedene Arbeitshypothesen, die im Laufe der Forschungsarbeiten bestätigt oder falsifiziert werden. Sie bilden die Grundvoraussetzung für das Gelingen der Arbeit und sind die Basis für die Definition der Zielsetzung. Gleichzeitig soll mit der Beschreibung des Forschungsschwerpunktes auf relevante partikuläre Verschmutzungen aus den Bereichen Automobil, Elektrotechnik und Maschinenbau der Untersuchungsgegenstand sowie die Gültigkeit der Arbeitshypothesen eingegrenzt werden:

- 1. Partikel entstehen durch nachweisbare Entstehungsmechanismen.**
- 2. Partikel weisen Merkmale auf, die eine Zuordnung zu spezifischen Entstehungsmechanismen zulassen.**
- 3. Durch die Zahl der in der Industrie durchgeführten Sauberkeitsanalysen wird eine ausreichende Menge an Informationen erzeugt, um die Anwendung von Big Data Technologien zu rechtfertigen.**
- 4. Die Standard-Sauberkeitsanalyse nach VDA 19.1 erzeugt Bilder von ausreichender, gleichbleibender Qualität, um diese klassifizieren zu können.**

5. **Durch die Verwendung allgemein verfügbarer Hardware sowie Open-Source Software bzw. Softwarebibliotheken können leistungsfähige Modelle zur Klassifikation von Partikelbildern erstellt werden.**
6. **Partikelentstehung kann vermieden bzw. vermindert werden.**

Der Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt somit auf der Untersuchung der Partikelentstehungsmechanismen in Produktionssystemen oder der korrelierenden Ausprägung bestimmter Partikeleigenschaften. Ferner soll untersucht werden, ob durch aktuelle Ansätze des maschinellen Lernens eine Klassifikation von Partikelbildern aus der VDA 19.1 Standard-Sauberkeitsanalyse zuverlässig ausgeführt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Partikel weder bewusst erzeugt noch definiert extrahiert werden können, was eine Variation der Partikelausprägung durch Bruch, Orientierung auf dem Filter und Prozessparametervariation vermuten lässt. Eine Klassifikation von Fasern, pastösen oder filmischen Verschmutzungen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Da ferner der Fokus der Arbeit im Wesentlichen auf der Analyse von Partikeln und deren Entstehung liegt, werden Gegebenheiten aus der Define- und Measure-Phase (Festlegung von Grenzwerten, Parameter bei der Standardsauberkeitsanalyse) als gegeben angesehen. Zudem sind folgende Themen nicht Schwerpunkt der durchgeführten Forschungsarbeiten:

- Filmische Verschmutzungen
- Weiterführende Analyseverfahren
- Sauberkeitsgerechte Bauteilkonstruktion

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens lässt sich demnach wie folgt formulieren: **Die Nutzbarmachung während der Standard-Sauberkeitsanalyse erzeugter Bildinformationen durch eine Zuordnung zu produkt-, prozess- und ressourcenübergreifenden Entstehungsmechanismen mit Verfahren des maschinellen Lernens zur Ableitung und Überwachung zielgerichteter Verbesserungsmaßnahmen und zur systematischen Regelung sauberkeitssensibler Produktionssysteme.** Mit den zu erwartenden Ergebnissen wird der Stand der Forschung hinsichtlich der Partikelentstehung in soziotechnischen Systemen erweitert sowie die Umsetzung von Regelkreisen bzgl. der TecSa mit geringem Zusatzaufwand unterstützt.

2. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erstreckte sich über einen Zeitraum von 24 Monaten. Die folgend vorgestellten Arbeiten und Ergebnisse wurden durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter sowie eine studentische Hilfskraft erstellt und erfolgten in engem Austausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA).

2.1 AP 1: Anforderungsanalyse an eine Systematik zur Gestaltung von Reinigungskonzepten

▪ Durchgeführte Arbeiten

Das Arbeitspaket (AP) 1 dient der Erarbeitung praxisrelevanter Anforderungen an eine Systematik zur Regelung sauberkeitssensibler Produktionssysteme. Diese umfassen insbesondere Anforderungen an die Analyse und Verbesserung. Diese Anforderungen wurden im Rahmen von Expertengesprächen und Workshops mit den Unternehmen des PA ergänzt, katalogisiert und priorisiert. Durch die Diskussion der Anforderungen mit den im PA vertretenen Dienstleistern wurde die spätere Umsetzbarkeit der Anforderungen in einem IT-Demonstrator bewertet und in Form von Anwendungsfällen beschrieben.

▪ Erzielte Ergebnisse

Aus den vielfältigen Gesprächen mit Experten und Unternehmenspartnern lassen sich folgende Anforderungen zusammenfassen:

- *Alternativenbetrachtung*: Aus technologischer Sicht besteht eine Vielzahl von Reinigungsverfahren, -anlagen und Möglichkeiten der räumlichen Organisation. Zudem kann TecSa auch durch gezielte Vermeidungsmaßnahmen und durch die Tolerierung einer größeren Schmutzmenge bzw. größerer Partikel erzeugt werden. Die Identifikation und Bewertung einer Maßnahme soll aus diesem Grund durch ein iteratives Vorgehen möglich sein.
- *Aufwandsgerechte Anwendung*: Die Systematik und die erstellten Hilfsmittel sollen aufwandsarm anwendbar sein.
- *Quantitative Bewertung*: Die erzielten Ergebnisse der Analyse und der Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen sollen möglichst analytisch, quantitativ bewertbar sein.
- *Berücksichtigung fertigungsspezifischer Rahmenbedingungen*: Um eine Systematik zur Auswahl optimaler Reinigungskonzepte zu gestalten, dürfen die Rahmenbedingungen und Restriktionen der bestehenden Wertströme nicht losgelöst vom ermittelten Reinigungskonzept betrachtet werden. Vielmehr ist zu untersuchen, welche Rahmenbedingungen für die Erzeugung von Verschmutzungen relevant sind.
- *Wertstromübergreifende Betrachtung*: Ziel des Forschungsvorhabens ist das Erstellen transferierbarer Ergebnisse. Das heißt es ist sicherzustellen, dass eine Validierung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Anwendungsfällen zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Ferner wurde der Einsatz von Reinigungsverfahren in Wertströmen diskutiert. Hier zeigt sich folgendes Dilemma: Speziell in Montagesystemen lässt sich eine Eingangsreinigung einfacher realisieren als eine Zwischen- oder Endreinigung. Zu Beginn des Montagesystems ist das Bauteil sehr gut zugänglich und die Restriktionen an das Reinigungsverfahren, resultierend aus bspw.

verschiedenen Werkstoffeigenschaften, sind gering. Gleichzeitig muss nach der Reinigung sichergestellt werden können, dass das Bauteil durch Prozesse, verunreinigte (Zukauf-)Teile oder durch Verschleppung von Ressourcen nicht erneut verschmutzt wird. Bei einer Reinigung am Ende des Wertstroms, idealerweise vor dem Verschließen der primären kritischen Stellen am Bauteil, kann eine Vielzahl an Restriktionen zur Nichteinsetzbarkeit bestimmter Reinigungsverfahren führen. Diese Fragestellung wurde zusammen mit den aufgenommenen Anforderungen in AP 2 weiter verfolgt.

2.2 AP 2: Identifikation und Charakterisierung von Reinigungsfällen

▪ Durchgeführte Arbeiten

Das angestrebte Ergebnis dieses Arbeitspakets bestand in einer Charakterisierung von Reinigungsfällen, welche in der Praxis durch die Anlagenhersteller umgesetzt werden können. Im Rahmen der Diskussion mit Vertretern des PA wurde deutlich, dass die Fragestellung nach Maßnahmen zur Reduzierung von Partikeln bei Bearbeitung dieser Zielstellung mit einbezogen werden sollte. Vor allem bei Bauteilen, die sich im Montageprozess befinden, ist eine Zwischenreinigung nur zielführend, wenn eine Verschmutzung durch den nachfolgenden Prozess ausgeschlossen werden kann. Gleichzeitig nimmt die Zugänglichkeit von Baugruppen (ZB) wertstromabwärts ab. Im Rahmen des Teilarbeitspaket (TAP) 2.1 wurden vier Ansätze entwickelt und an einem Anwendungsfall validiert, um Verschmutzungen entlang des Wertstroms zu ermitteln. In TAP 2.2 erfolgt die Ableitung eines Leitfadens zur Analyse und Charakterisierung von Reinigungsfällen.

▪ Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des AP 2 wurden verschiedene Ansätze zur Analyse sauberkeitssensibler Produktionssysteme entwickelt und validiert. Als wesentliche Ergebnisse stehen ein Modellierungsansatz für Verschleppungspfade, die eine Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen ermöglichen sowie die Erkenntnis, dass in verschiedenen Prozessen Partikel mit charakteristischen Eigenschaften erzeugt werden. Partikel, die am Ende des Wertstroms detektiert werden können, können mit der Kenntnis dieser Eigenschaften spezifischen Quellen zugeordnet werden, was einen erheblichen Vorteil zur Ableitung von zielgerichteten Verbesserungen mit sich bringt. Ferner wurde ein Vorgehen definiert, welches eine Charakterisierung von Reinigungsfällen ermöglicht und die wesentlichen Einflussgrößen auf die Auswahl von Reinigungsverfahren aufzeigt.

2.2.1 TAP 2.1: Identifikation und quantitative Beschreibung von Reinigungsfällen

Im Rahmen von TAP 2.1 erfolgt die Untersuchung verschiedener Ansätze zur Analyse sauberkeitssensibler Produktionssysteme. Folgend werden diese sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse vorgestellt.

2.2.1.1 Wertstromscreening

Als grundsätzliche Eingangsinformationen für die Analyse von sauberkeitssensiblen Produktionssystemen dienen Bauteilzeichnungen, Sauberkeitsgrenzwerte für definierte Bauteilflächen und Zukaufteile, Vorranggraphen, Arbeitspläne, Qualitätsberichte, die Dokumentation des Extraktionsverfahrens und die Ergebnisse von Sauberkeitsanalysen von Bauteilen und der Umgebung.

Durch den Abgleich von Sauberkeitsgrenzwerten mit den Ergebnissen von Restschmutzanalysen von Bauteilen unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen, können im Rahmen einer groben Analyse (Screening) Sauberkeitslücken entlang des Wertstroms identifiziert und eingegrenzt werden. Das Screening umfasst dabei die Entnahme von Halbfertig- und Fertigbauteilen aus dem Serienprozess an definierten Messpunkten sowie die Analyse der Umgebungssauberkeit in der direkten Umgebung der relevanten Bauteiloberflächen. Die Anzahl und Lage der Messpunkte ist nicht pauschal bestimmbar und ist im Rahmen des jeweiligen Wertstroms sowie einer Aufwand/Nutzen-Abschätzung mit Experten aus dem Wertstrom, der Qualitätsabteilung sowie dem SauberkeitsanalySELabor festzulegen.

Zwischenergebnis:

In den Validierungsschleifen zeigt sich, dass in der Praxis meist mehrere Stellen im Wertstrom identifiziert werden können, an denen die festgelegten Grenzwerte überschritten werden. Dies lässt sich auf zwei wesentliche Effekte zurückführen. Einerseits besteht eine Vielzahl von möglichen Ursachen, die zu einer Verschmutzung führen können, andererseits führt das erstmalige Überschreiten des Grenzwertes oftmals zu weiteren Überschreitungen in den Folgeprozessen. Darüber hinaus ließ sich feststellen, dass die Verschmutzungen, die am Ende des Wertstroms im Bauteil gemessen werden konnten, nicht zwangsläufig mit dem Prozess korrelieren, der im Rahmen des Screenings die meisten Verschmutzungen bzw. die größten Partikel erzeugt. Dies lässt den Schluss zu, dass der Aspekt der Haftung der Partikel einen großen Einfluss auf die messbare Bauteilverschmutzung darstellt.

Ferner können von Herstellern und Betreibern derzeit keine SGW für technische Prozesse angegeben werden. Die Analyse ob ein technischer Prozess bei gegebener Verschmutzung prozesssicher zum gewünschten Ergebnis führt, erfolgt in vielen Unternehmen empirisch. Die Definition spezifischer SGW für technische Prozesse konnte im Rahmen der Forschungsarbeiten nicht geleistet werden, sodass an dieser Stelle weiter Forschungsbedarf besteht.

2.2.1.2 Ansatz der isolierten Prozessanalyse

Als zweiter Ansatz wurde der Ansatz der isolierten Prozessuntersuchung verfolgt, um Partikel am Ende des Wertstroms spezifischen Prozessen zuordnen zu können (sog. Perfektteilanalyse). Den spezifischen Prozessen wurden dazu gereinigte Bauteile zugeführt und unter möglichst sauberen Bedingungen (gereinigte Anlage, neue Handschuhe etc.) montiert. Ferner wurden Zukaufteile hinsichtlich ihrer metallurgischen Zusammensetzung (Material-Foodprint) sowie typischer Verschmutzungen untersucht.

Zwischenergebnis:

Der Ansatz der isolierten Prozessuntersuchung führt zu dem Ergebnis, dass anhand der Untersuchungsergebnisse sehr gut von den Verschmutzungen auf dem Bauteil am Ende des Wertstroms auf die Partikelentstehung in den einzelnen Prozessen geschlossen werden kann. Darüber hinaus zeigt sich, dass Teile der Bauteiloberfläche durch Handling oder Kontakt mit Ressourcen (Abrasion) von der Bauteiloberfläche gelöst werden. Die Ursachen für die Partikel liegen jedoch zumeist in vorgelagerten Fertigungsprozessen (Urformen bzw. Trennen).

Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass dieses Vorgehen mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist. Insbesondere die Flüssigkeitsextraktion führte zu einem hohen Analyseaufwand. Darüber hinaus ist es erforderlich die erzielten Ergebnisse auf geeignete Art und Weise zu dokumentieren und für weitere Anwendungsfälle zugänglich zu machen. Hier ließ sich feststellen, dass die erzeugten Partikelbilder in Kombination mit den jeweiligen Eigenschaften eine gute Basis darstellen. Eine qualitative, subjektive Beschreibung der Partikelmerkmale i.S.v. „sichelförmig“ oder „ausgefranzt“ erschien jedoch für eine allgemeine Nutzung der Ergebnisse als unzureichend, sodass in AP 5 dieses Themenfeld mit alternativen Werkzeugen aus dem Bereich der Bildverarbeitung und dem maschinellen Lernen bearbeitet wurde.

2.2.1.3 Modellierung von Verschleppungspfaden

Durch die grafische Darstellung soll eine systematische Abbildung der Verschleppung über alle Prozesse hinweg ermöglicht werden. Grundgedanke der Modellierung bildet der Grundsatz von innen nach außen [32]. Anhand der Modellierung der Verschleppung ist es möglich, nicht zwangsläufig die Ursachen bzw. die Quellen der Verschmutzung ermitteln zu müssen, sondern den Pfad von der Quelle auf die kritischen Flächen des Bauteils beeinflussen zu können. Den grundsätzlichen Modellierungsansatz sowie die verwendete Symbolik zeigt Abbildung 1:

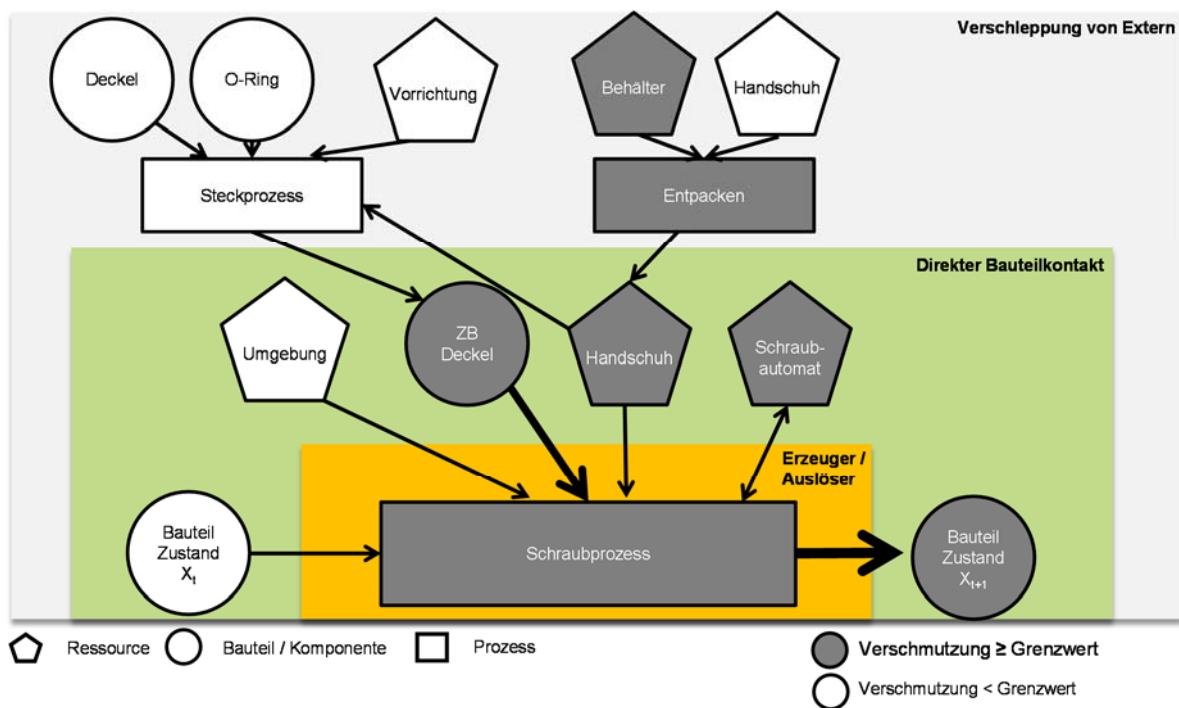


Abbildung 1: Ansatz zur Modellierung von Verschleppungspfaden an einem exemplarischen Beispiel

Die Anwendung der Methodik kann in zwei Schritten erfolgen. Zuerst ist ein Mapping durchzuführen, welches die Bauteile und Ressourcen sowie deren Beziehungen (Kanten) untereinander darstellt. Anschließend erfolgt die Bewertung des Verschmutzungszustandes des Bauteils anhand der definierten SGW. Dies kann durch Direktinspektion oder durch die beschriebenen Sauberkeitsanalyseverfahren erfolgen.

Die anschließenden Verbesserungsmaßnahmen können anschließend an vier Punkten ansetzen:

1. Verbesserung der Transformationsprozesse durch konstruktive Änderungen oder durch Prozessänderungen.
2. Entkopplung von Prozessen bzw. Arbeitsvorgängen: Diese kann durch organisatorische Maßnahmen oder die Nutzung geeigneter Verpackungsstrategien erfolgen (Zwiebelschalenprinzip). Diese Maßnahme ist jedoch nicht überall umsetzbar, da das Bauteil über die entsprechenden Wertschöpfungsstufen hinweg Partikel verschleppt. Ferner können Verschleppungspfade (Kanten) zwischen Elementen durch eine prozessintegrierte Absaugung positiv beeinflusst werden, da somit der Pfad vom Ort der Entstehung hin zum Bauteil, der durch das ballistische Verhalten der Partikel gegeben ist, aufgehoben werden kann.
3. Identifikation der Partikelursachen: Dies kann mit Hilfe von Prozessuntersuchungen und der Auswertung der Sauberkeitsanalysen erfolgen, bedarf jedoch weiterer Forschungsarbeit hinsichtlich Datenbasis und softwaretechnische Umsetzung.
4. Spezifische Reinigung von Bauteilen, Komponenten oder Ressourcen: Die Lokalisierung dieser Reinigungsfälle kann durch die vorgestellte Methodik erfolgen.

Zwischenergebnis:

Die Anwendung der Methodik macht die Verschleppung sowie die Ansatzpunkte für die beschriebenen Maßnahmen transparent. Sie bietet die Möglichkeit gezielte Maßnahmen zu ergreifen und Wechselwirkungen zwischen einzelnen Elementen zu hinterfragen. Ferner wird eine gezielte Auswahl von Maßnahmen bzw. die Prognose deren Wirkung ermöglicht.

2.2.1.4 Untersuchung der Umgebungssauberkeit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Alternative zur bestehenden Ergebnisauswertung der Umgebungsanalysen nach Illig [32] entwickelt. Während die VDA 19.2 [32] den Illig-Wert (Gewichtete Summe der Partikel in verschiedenen Größenklassen) als wesentliche Zielgröße angibt, wird im Forschungsvorhaben die Robustheit der jeweiligen Umgebung zugrunde gelegt. Diese ermittelt sich aus mehreren aufeinander folgenden Messungen und nutzt als Kenngrößen die mittlere Anzahl der Partikel mit einer Größe > SGW sowie den Variationskoeffizient (Abbildung 2). Mit diesem Vorgehen kann der Problemstellung der Grenzwertvorgabe für bestimmte Umgebungen bei definierter maximaler Partikelgröße begegnet werden.

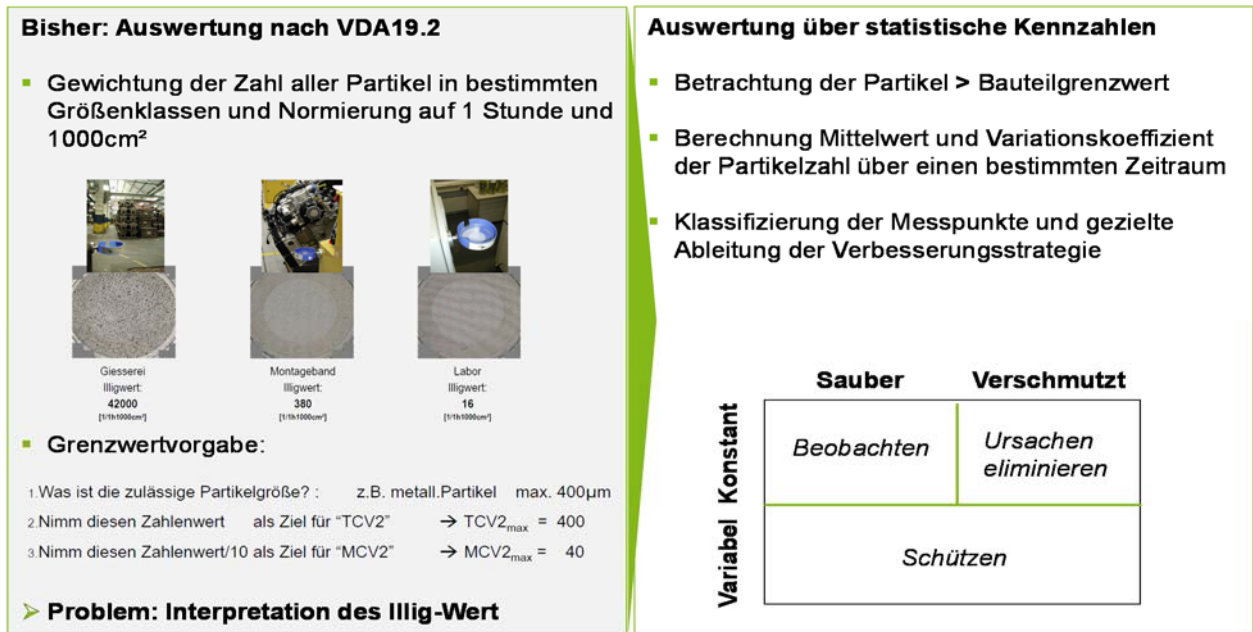


Abbildung 2: Bewertung der Umgebungssauberkeit anhand statistischer Kennzahlen (TCV..Total Contamination Value; MCV...Metallic Contamination Value)

Zwischenergebnis:

Aus diesen Informationen kann die jeweilige Umgebung nach ihrer TecSa und deren Stabilität klassifiziert werden. Diese Auswertung ist zum einen deutlich objektiver als der Illig-Wert und lässt die Ableitung geeigneter Maßnahmen zu. So können stabile, technisch nicht saubere Umgebungen zielgerichtet auf Ursachen hin untersucht und verbessert werden. Nicht stabile Umgebungen sind zu stabilisieren, indem Schutzmaßnahmen getroffen werden. Eine Identifikation möglicher Verschmutzungsquellen bzw. eine pauschale Reinigung ist hier nicht zielführend.

2.3 AP 3: Bewertung und Auswahl von Reinigungsverfahren und -anlagen

- Durchgeführte Arbeiten

Inhalt dieses AP bildet die Entwicklung einer Systematik zur Bewertung der Eignung einer Reinigungsanlage. Hierzu wurden empirische Analysen sowie Befragungen durchgeführt.

- Erzielte Ergebnisse:

- Es gibt eine Vielzahl von Bauteilreinigungsverfahren, deren Eignung in Abhängigkeit von der erforderlichen Qualität der Reinigung, dem Werkstoff des Bauteils, den Eingangsverschmutzungen und den Prozessen nach der Reinigung zu prüfen ist.
- Vorversuche geben einen Aufschluss über die tatsächliche Eignung des Verfahrens für die vorliegenden Reinigungsfälle.
- Reinigungsparameter können systematisch untersucht werden. Im Bereich der Reinigung mit ionisierter Druckluft ist bei einem Mediendruck < 2 bar ein hohes Risiko für einen erhöhten Restschmutzgehalt festzustellen. Aus wirtschaftlicher Sicht betrachtet, liefert eine 1,0 mm Düse bei einem Mediendruck von 2 bar das beste Verhältnis aus Reinigungsleistung und Druckluftverbrauch. Hervorzuheben ist, dass das Reinigungsergebnis hinsichtlich maximaler Partikelgröße nicht prozesssicher dargestellt werden kann.

4. Eine Web-Plattform als Planungs- und Entscheidungsunterstützungswerkzeug für die Integration von Reinigungsanlagen ist als Ergänzung zu bestehenden Simulationswerkzeugen für die Fabrikplanung zwar technisch umsetzbar, entspricht jedoch nicht den Gegebenheiten der Praxis.

2.3.1 TAP 3.1: Quantitative Bewertung der Eignung von Reinigungsverfahren und -anlagen

Übergreifend kommen Experten zu der Aussage, dass die Eignung eines Reinigungsverfahrens nicht pauschal beurteilt werden kann. Diese Aussage wird auch durch das Modell des erweiterten Sinnerschen Kreises nach [37] gestützt (Kapitel 2.4). Wesentlich zielführender erscheint die Fragestellung nach K.O.-Kriterien, die den Einsatz bestimmter Reinigungsverfahren ausschließen. Dieser Aspekt spielt vor allem bei der wässrigen Reinigung, bezogen auf die Anwendung verschiedener Reinigungsmedien, eine wichtige Rolle.

Um die Auswahl eines Verfahrens treffen zu können oder ein bestehendes Verfahren auf seine Funktion hin zu überprüfen, ist es wichtig, die Reinigungseffizienz quantitativ zu bestimmen und vergleichbar zu machen. Dazu lassen sich die Verfahren der Reinheitsvalidierung verwenden, wie sie die VDA 19.1 Richtlinie vorgibt. Durch den Vergleich des Reinheitszustandes eines definiert kontaminierten Reinigungsgutes vor und nach der Reinigung kann die Reinigungseffizienz einer Anlage bestimmt werden [17].

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des gravimetrischen Restschmutzgehalts ergibt eine signifikante Relevanz der Einflussparameter Druck und Düsendurchmesser. Es zeigt sich, dass vor allem bei niedrigem Druck der Düsendurchmesser einen starken Einfluss hat. Ferner konnte festgestellt werden, dass sich ein Optimum aus Druck und Düsendurchmesser ermitteln lässt. Beim Überschreiten dieses Optimums nimmt der Druckluftverbrauch zu, ohne eine Steigerung der Reinigungsleistung zu erzielen. Das aus ökonomischer Sicht beste Ergebnis stellt der Düsendurchmesser von 1,0 mm dar, da mit knapp unter 2 bar Druck bereits ein Restschmutzwert $< 2\%$ erreicht wird. Es lässt sich zudem bei einem Düsendurchmesser von 1,8 mm und einem Druck von > 4 bar eine Verschlechterung des Reinigungsergebnisses beobachten.

Die Expositionszeit und die Durchlaufrichtung des Referenzbauteils beeinflussen das Ergebnis dagegen nicht signifikant. Ferner zeigt sich, dass der Abstand der Düse vom Bauteil ab einem bestimmten Druck keinen Einfluss mehr hat. Diese Erkenntnis ist vor allem bei stark profilierten Bauteilen relevant.

Darüber hinaus wurden die Grenzen in denen der Reinigungsprozess ablaufen muss untersucht, um bestimmte SGW zu erzielen. Als Grenzwerte wurden ein Restschmutzgewicht von 0-5 % des Ausgangsgewichts und das größte metallische Partikel auf eine $Feret_{max}$ -Länge von max. 400 μm festgelegt. Während sich für das zulässige Restschmutzgewicht belastbare Reinigungsparameter ermitteln ließen, konnten für die Partikelgröße keine prozesssicheren Parameter gefunden werden.

2.3.2 TAP 3.2: Formalisierung des Anfrage- und Angebotsprozesses

Das Ziel dieses Arbeitspaketes besteht im effizienten Abgleich zwischen den Anforderungen des Reinigungsfalls sowie dem jeweiligem Leistungsprofil der Anlage. Um den dafür erforderlichen Kommunikationsprozess zwischen Betreiber und Hersteller effizient zu gestalten, wird der Anfrage- und Angebotsprozess zwischen Reinigungsanlagenbetreiber und -hersteller (in der Folge als Betreiber und Hersteller bezeichnet) in TAP 3.2 strukturiert und formalisiert. Durch den formalisierten Anfrage- und Angebotsprozess können unterschiedliche Reinigungskonzepte schneller angeboten und von den Betreibern bewertet werden.

Zur Formalisierung des Anfrage- und Angebotsprozesses galt es im ersten Schritt zu prüfen, wann welche Informationen entlang des Produktlebenszyklus (PEP) bei Betreiberunternehmen verfügbar sind. Eine gute Basis für die Beantwortung dieser Fragestellung liefern Wenzel und Costerousse anhand des PEP der Robert Bosch GmbH und der Audi AG (Abbildung 3).



Abbildung 3: TecSa-Elemente im PEP bei Bosch und Audi [35]

Wie in Abbildung 3 werden Reinigungsanlagen im Rahmen der Produkt-/ Prozessentwicklung ausgewählt und projiziert. Zu diesem Zeitpunkt liegen die Sauberkeitsanforderungen für das Produkt und dessen Komponenten sowie für die einzelnen Fertigungsbereiche vor. Zudem werden in dieser Phase des PEP Prozesskettenanalysen und Prozess-FMEAs (P-FMEA) durchgeführt. Die regelmäßige Messung der Partikelbelastung startet mit seriennahen Teilen (C-Mustern). Ferner zeigt sich, dass nach SOP (Start of Production) regelmäßige Überprüfungen der Einhaltung der SGW durch Sauberkeitsaudits und -assessments durchgeführt werden.

Koblentz [15, 20] stellt im Rahmen der ersten Sitzung des PA folgendes Vorgehen zur Projektierung und Auslegung von reinigungstechnischen Verfahren vor.

1. Basisanforderungen [Betreiber]

- **Eingangsinformationen:**

Den Ausgangspunkt der Projektierung bildet die Aufnahme der relevanten Kriterien auf Basis eines definierten Lastenheftes. Dazu sind folgende Punkte durch den Betreiber zu definieren.

- Qualitativ definiertes Reinigungsergebnis bzw. zu erzielender SGW

- Vorgelagerte und nachgelagerte Prozessketten
- Erforderliches Teilehandling in und nach der Anlage (Schüttgut, Einzelteile, Setzware)
- Art der Eingangverschmutzung
- Anzahl der Reinigungsfälle (Einprodukt- oder Mehrproduktproduktion)
- Geometrie und Material des Bauteils/ Temperaturverträglichkeit
- Korrosionsschutzanforderungen
- Durchsatz bzw. Taktzeit
- Räumliche Organisationsform der Anlage
- Upgradefähigkeit (Ausbaustufen hinsichtlich Qualität, Durchsatz und rechtlichen Vorschriften)
- Wartung

- **Ergebnis:**

Das Ergebnis dieser Phase bildet die Klärung der tatsächlichen Anforderungen an die Reinigungsanlage sowie die Spezifizierung eines Lastenheftes.

2. Marktanalyse und Vorgespräche [Betreiber]

Insbesondere bei fluidbasierten Reinigungsverfahren ist zu klären, ob lösemittel- oder wasserbasierte Reinigungsmedien zum Einsatz kommen können. Dies wird wesentlich vom Materialspektrum und der Art der Verschmutzungen beeinflusst. Darum es ist sinnvoll die erhobenen Anforderungen mit Experten und Herstellern zu diskutieren und auf deren grundsätzliche Erfüllung zu prüfen.

Ferner ist eine Marktanalyse durchzuführen, um die Liste der potentiellen Hersteller einzugrenzen. Als grundsätzliche Informationsquellen für die Reinigungstechnik eignen sich:

- Messe Parts2Clean, Stuttgart
- Messe LOUNGES, Karlsruhe
- Fachverband industrielle Teilereinigung (FIT)
- Cleaning Excellence Center Leonberg e.V. (CEC)
- Internetseite <http://www.cleantool.org>
- Internetseite <http://www.bauteilreinigung.de> (bei Prüfung offline)
- Internetseite <http://www.wlw.de>

- **Ergebnis:**

Als Ergebnis dieser Phase steht eine Auswahl potentieller Hersteller, mit denen im nächsten Schritt Vorversuche durchgeführt werden können. Die Kapazitäten des Betreibers und die Verfügbarkeit von Bauteilen für Vorversuche sollte hier die Anzahl potentieller Hersteller begrenzen.

3. Durchführung von Vorversuchen und Referenzbesuchen [Hersteller + Betreiber]

- **Eingangsinformationen:**

Basierend auf den Basisanforderungen sind Lösungsalternativen durch entsprechende Vorversuche zu prüfen. Hierzu sind vom Betreiber der Anlage möglichst seriennahe Bauteile in ausreichender Anzahl zur Verfügung zu stellen. Diese sollten gratfrei sein und möglichst wenig Restmagnetismus aufweisen. Ferner ist durch Hersteller und Betreiber die Prozedur zur Sauberkeitsanalyse der Bauteile abzustimmen. Diese Abstimmung ist entscheidend, um einerseits gezielte Prozessoptimierungen des Reinigungsverfahrens durchführen zu können, andererseits um unterschiedliche Validierungsergebnisse zwischen Hersteller und Betreiber herbeizuführen, die Konfliktpotential für die Geschäftsbeziehung mit sich bringen. Ferner gilt es, bei der wässrigen Reinigung den anschließenden Trocknungsprozess in die Vorversuche mit einzubeziehen, da dieser abhängig von der Bauteilgeometrie die Gesamtprozesszeit signifikant verlängern kann und je nach Temperaturverträglichkeit des Bauteils zu Verzug oder anderen unerwünschten Transformationen des Bauteils führt.

Ferner können durch Referenzbesuche bei Unternehmen mit vergleichbaren Reinigungsfällen wichtige Informationen gewonnen werden. Durch die Diskussion der Anforderungen zwischen dem Hersteller und den Betreibern zeigen sich Vor- und Nachteile bzgl. der Integration der Anlage, Medienanschluss sowie Wartung.

Als dritten wichtigen Schritt nennt Koblenzer [20] die Einbindung des jeweiligen Lieferanten des Reinigungsmediums bei Vorversuchen zur nasschemischen Reinigung. Die Chemie ist dabei ein relevanter Reinigungsparameter, der jedoch häufig nicht zum Leistungsspektrum der Anlagenhersteller zählt. Nur wenn alle Parameter des erweiterten Sinnerschen Kreises möglichst realitätsnah ausgeprägt werden können, sind die Ergebnisse der Vorversuche auch belastbar.

- **Ergebnis:**

Durch die Ergebnisse der Vorversuche lassen sich Aussagen zu der generellen Umsetzbarkeit der Basisanforderungen machen, bzw. zu deren Abhängigkeiten. Ferner kann die erforderliche Gesamtprozesszeit für das Erreichen der gewünschten SGW ermittelt werden. Dies beeinflusst bei gegebener Taktzeitvorgabe die Auslegung der Anlage als sequentielle Mehrkammeranlage oder als Batchprozess. Ferner lassen die Ergebnisse Rückschlüsse zur Standzeit des Reinigungsmediums sowie verschiedener Filter zu. Durch die Begleitung der Vorversuche durch den Betreiber können zudem Optimierungsansätze hinsichtlich der konstruktiven Bauteil-auslegung (reinigungsgerechte Konstruktion [13]) und den erzeugten Verschmutzungen durch Vorprozesse als Ergebnis der Vorversuche stehen.

4. Festlegung der Anlagenkonfiguration und Erstellung der Anlage [Hersteller + Betreiber]

- **Eingangsinformationen:**

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche sowie weiteren Anforderungen des Betreibers können vom Hersteller Anlagenkonfigurationen erstellt und dem Betreiber angeboten werden. Diese zusätzlichen Anforderungen betreffen die verfügbaren Flächen, die erforderliche Prozessüberwachung, die Einbindung in die IT-Infrastruktur (MES-System), die Medienaufbereitung, sowie die Bauteilver- und entsorgung der Anlage. Koblenzer [19] stellt in diesem Zusammenhang den Aspekt der Energieeffizienz der Anlage heraus, die bspw. durch die Nutzung bestehender Wärmequellen im Fertigungslayout gesteigert werden kann. Ferner diskutiert Koblenzer [20] die Vor- und Nachteile von Standard- und kundenspezifischen Sonderanlagen und nennt die Nutzung standardisierter Modulsysteme als Kompromiss zwischen hoher Prozesssicherheit, Anpassbarkeit und Kosten.

- **Ergebnis:**

Das finale Angebot sowie konkrete Anlagenkonfigurationen bilden das Ergebnis dieser Phase. Nach der wirtschaftlichen Prüfung sowie der Vereinbarung über die Lieferzeit kann die Beauftragung der Anlage erfolgen.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses TAP und durch Gespräche mit Experten wurde deutlich, dass in der Phase der Produkt- und Prozessentwicklung grundsätzlich die erforderlichen Informationen zur Beschaffung einer Reinigungsanlage beschafft werden. Zudem sind insbesondere bei schlechter Datenlage, komplexen Bauteilen sowie unbekanntem Verschmutzungen Vorversuche unumgänglich. Problematisch sind in vielen Unternehmen die zu späte Berücksichtigung der TecSa bzw. das Vorgehen zur Festlegung der entsprechenden Vermeidungs- und Reinigungsmaßnahmen. In Verbindung mit der Notwendigkeit der Durchführung von Vorversuchen kann es zu zeitlichen Problemen im PEP führen. Ferner ist die Bereitschaft der Betreiber in der Phase der Produkt- und Prozessplanung Informationen zu teilen sehr gering. Somit zeigt sich, dass der Aufbau einer Web-Plattform als Planungs- und Entscheidungsunterstützungswerkzeug für Reinigungsanlagen zusätzlich zu bestehenden Simulationswerkzeugen für die Fabrikplanung zwar technisch möglich ist, jedoch nicht den Gegebenheiten der Praxis entspricht. Bezüglich der Umsetzung der Forschungsergebnisse als webbasierte Plattform musste der Fokus deshalb auf die in Kapitel 4.5 beschriebenen Inhalte verlagert werden.

2.4 AP 4: Beschreibung und Modellierung der räumlichen Organisationsform

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Untersuchung der räumlichen Organisation von Reinigungsanlagen basiert auf Expertenbefragungen, auf einer Zusammenfassung von Unterlagen die von einem Mitglied des PA während der Laufzeit des Forschungsvorhabens erstellt wurden [19] sowie auf einem analytisch, mathematischen Ansatz.

▪ Erzielte Ergebnisse

Unter anderem zeigte sich dabei, dass in der Praxis folgende Organisationsformen von Reinigungsanlagen etabliert sind:

- Universal-Insellösung zentral: manuell bestückte oder teilautomatisierte Einzelanlagen für die Reinigung von Bauteilen aus unterschiedlichen Bereichen mit vergleichbaren Aufgabenstellungen an die Reinigung
- Spezialisierte Insellösung zentral: teil- oder vollautomatisierte Reinigungszellen in Form von mehreren Anlagenbausteinen für bauteilspezifische Teilereinigung
- Inlineprozess dezentral: entweder vollautomatisierte Einzelanlagen oder vollautomatisiertes redundantes Mehranlagensystem, integriert in den Fertigungsprozess
- Dezentraler Einsatz in autonomen Fertigungszellen: automatisiert oder manuell bedient

Dezentrale Verfahren reduzieren die Logistik- und Handlingskosten und erlauben beim Einsatz in Fertigungszellen ein hohes Maß an Flexibilität. In Einzelanlagen ist die rein dezentrale Reinigung oft mit festgelegten Fertigungs-, Mess- und Montageprozessen verknüpft. Selbst bei geringer Auslastung der Prozesskette kann die Anlage oder Teile der Anlage somit nicht abgeschaltet werden. Dies hat negative Auswirkungen auf die Energiekosten. Zudem stellt eine spezialisierte Einzelanlage einen potentiellen Engpass ohne jegliche Redundanz dar. Zudem sind diese Lösungen mit einem verhältnismäßig hohen personellen Betreuungsaufwand verbunden. Zentrale Varianten tragen in der Regel zur Betriebs- und Investitionskostenreduzierung bei. Gleichzeitig haben sie folgende Nachteile:

- Bottleneck-Effekt
- Erhöhung des Anteils an den Stückkosten bei sinkenden Stückzahlen
- Anpassungen sind schwer möglich
- Auslegung der Anlage auf Maximalanforderungen der Bauteile und Verschmutzung erforderlich

Aufgrund der Komplexität heutiger Produktionssysteme entwickeln sich zunehmend Misch-Lösungen, die den relevanten Aspekten Prozesssicherheit, Verfügbarkeit sowie Betriebs- und Investitionskosten gerecht werden können. Zur Ermittlung dieser Misch-Lösungen wurde das AP methodisch mit einer umfassenden Untersuchung der bestehenden qualitativen und quantitativen Bewertungsverfahren für Standortentscheidungen, Verfahren zur Layoutplanung sowie Ansätzen zur Lösung von Facility Layout Problems (FLP) aus den Bereichen Operations Research begonnen. Die klassischen mathematischen Entscheidungsmodellformulierungen für Standort- und Layoutprobleme bedienen sich einer der exaktesten Betrachtungen zur Lösung des Sachverhaltes. Es handelt sich hierbei oftmals um ganzzahlige nichtlineare (quadratische)

Programme. Aufgrund ihrer Komplexität sind diese Programme jedoch sehr rechenaufwändig und können in der Praxis häufig nicht innerhalb einer angemessenen Zeitspanne zu einer optimalen Lösung führen [3]. Ferner stellt sich heraus, dass sich einzelne Faktoren, wie bspw. Flexibilität nicht in diskrete Werte überführen lassen, was eine rein quantitative Bewertung erschwert.

Es zeigt sich, dass die exakte Lösung der Problemstellung mit einem sehr hohen Rechenaufwand verknüpft ist. Dieser lässt sich nicht mehr manuell handhaben. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle auf Simulationsmodelle zurückgegriffen werden, die die Zielfunktion sowie deren Nebenbedingungen abbilden.

2.5 AP 5: Sauberkeitsgerechte Materialflussgestaltung und -bewertung

▪ Durchgeführte Arbeiten

Das AP 5 baut auf den wesentlichen Ergebnissen von AP 2 auf. Zum einen zeigte sich, dass aus den Eigenschaften der Partikel auf die jeweiligen Ursachen ihrer Entstehung in Produktionssystemen zurückgeschlossen werden kann. Zum anderen besteht keine softwareseitige Unterstützung für diese Zuordnung. Die durchgeführten Arbeiten in AP 5 fokussieren somit den Aufbau eines Partikelkataloges sowie den Einsatz von Verfahren des maschinellen Lernens. Für die folgend beschriebenen Prozessuntersuchungen, die softwaretechnischen Umsetzungen sowie die Validierung der entwickelten Demonstratoren wurden die für AP 7 geplanten Personenmonate (PM) sowie anteilig PM von AP 6 eingesetzt.

▪ Erzielte Ergebnisse

1. Basierend auf 160 Prozessuntersuchungen wurde ein Katalog für Partikel aus Produktionssystemen entwickelt, der es erlaubt Partikel weit verbreiteten Prozessen zuzuordnen
2. Eine Softwaredemonstrator zur Mustererkennung in Partikelbildern anhand von Form-, Textur- und Farbmerkmalen
3. Ferner wurde eine Alternative zur Metall/ Nichtmetall- Klassifikation entwickelt, die gegenüber dem Vorgehen durch den Einsatz von Polarisationsfiltern nach VDA 19.1 gleichwertige Ergebnisse liefert und durch die Nutzung vielfältiger Klassifikationsmerkmale anpassbar ist. Dieser Demonstrator ist online verfügbar unter <http://partikelcheck.de:5000/>

2.6 AP 6: Gesamtsystematik zur Gestaltung und Bewertung von Reinigungskonzepten

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die in AP 6 entwickelte Gesamtsystematik fasst die beschriebenen Ergebnisse zusammen. Diese baut insgesamt auf einer Regelkreissystematik (TAP 6.1) auf. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzeugten Ergebnisse fokussieren insbesondere die Analysephase, welche, wie im Stand der Technik dargelegt, derzeit keine Verknüpfung der Messergebnisse und einer zielgerichteten Definition von Verbesserungsmaßnahmen unterstützt. Gleichzeitig unterstützt das definierte Vorgehen zur Auswahl und Integration von Reinigungsanlagen nicht nur die Verbesserung sauberkeitssensibler Produktionssysteme nach SOP sondern zudem die Produkt- und Prozessplanung. Darüber hinaus können durch den entwickelten Partikelkatalog umgesetzte Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung überprüft werden. Es wird ersichtlich, ob

Partikel aus spezifischen Entstehungsmechanismen oder Verschleppungspfaden weiterhin in den Messergebnissen detektiert werden können. Diese Form der Partikelanalyse lässt eine belastbare Aussage zum Erfolg definierter Maßnahmen zu.

▪ Erzielte Ergebnisse

Das Ergebnis dieses APs ist ein Regelkreis der TecSa auf Wertstromebene sowie die datentechnische Verknüpfung der einzelnen Phasen des Regelkreises. Hinsichtlich der Durchgängigkeit und Nutzung der Daten zur Regelung der TecSa in Produktionssystemen besteht eine deutliche Lücke zwischen den Messergebnissen und der Phase der Verbesserung. Dabei bilden in der industriellen Praxis diese beiden Phasen die wesentlichen Kostentreiber. Die Phase der Messung verursacht hohe Kosten durch die erforderlichen serienbegleitenden Analysen zum Nachweis der Einhaltung definierter SGW. In der Verbesserungsphase können hohe Kosten insbesondere durch die Initial- und Betriebskosten von Reinigungsanlagen sowie durch die Umsetzung unterschiedlicher Raumkonzepte entstehen.

Die entwickelte Gesamtsystematik basiert auf der datengetriebenen Vorgehensweise des DMAIC-Regelkreises und adaptiert die einzelnen Phasen auf das Qualitätsmerkmal TecSa. Ferner integriert sie die erstellten Forschungsergebnisse und ermöglicht somit einen durchgängigen Datenfluss durch alle Phasen des Regelkreises (Abbildung 4). Die zunehmende Integration neuer Produkte in bestehende Linien, die steigende Bedeutung der TecSa sowie die Tatsache, dass die Entstehung von Verschmutzungen nicht umfassend vorhergesagt werden kann, führt zu der Erfordernis sauberkeitssensible Arbeitssysteme auch nach SOP zielgerichtet zu analysieren und zu verbessern [28].



Abbildung 4: Regelkreis der Technischen Sauberkeit auf Wertstromebene

• **Define-Phase**

Den Ausgangspunkt des Regelkreises bildet die Define-Phase (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zu erstellende Daten in der Define-Phase

Erforderliche Informationen	Werkzeuge/ Datenquellen
SGW für definierte Bauteiloberflächen	- Zeichnungen - Kundennormen /interne Normen - Produkt-FMEAs
ggf. Reklamationen bzw. Berichte zu Ausfällen beim Kunden	- Vertrieb/ Reklamationsmanagement/ Sauberkeitslabor
Geforderte SGW für Lieferanten sowie Nachweis der Einhaltung	- Einkauf/ Lieferantenmanagement/ Sauberkeitslabor
Eingesetzte Transformationsprozesse sowie genutzte Prozessrouten	- Arbeitsplan bzw. Prozessablaufplan - Wertstromanalyse
Nacharbeiten an einzelnen Bauteilen	- Verpackungsplan
Vorliegende Ergebnisse von Sauberkeitsuntersuchungen und Sauberkeitsuntersuchungen ähnlicher Produkte	- Datenbanken Sauberkeitslabor oder Qualitätsmanagement
Abgestimmtes Vorgehen bei der Sauberkeitsanalyse (insb. der Extraktion) zwischen Kunden und betrachteten Unternehmen.	- Prüfberichte - Expertenaustausch - Ringversuche zwischen verschiedenen Laboren
Hallenlayout	- Industrial Engineering

Basierend auf diesen Informationen kann, falls noch nicht vorhanden, ein umfassendes Verständnis für das Produkt sowie dessen Erzeugung erstellt werden. Darüber hinaus können etwaige Reklamationen, die ein Anstoß für die Verbesserung der TecSa sein können, gezielt hinterfragt und Kommunikationsprobleme zwischen Kunden und Lieferant offengelegt werden. Ferner grenzen die SGW sowie bestehende Sauberkeitsuntersuchungen die Problemstellung auf bestimmte Verschmutzungen und Bauteilbereiche ein.

• **Measure-Phase**

Im Rahmen der Measure-Phase sind analog zum Vorgehen des DMAIC-Regelkreises in erster Linie Messpunkte, Messhäufigkeiten sowie Messverfahren zu definieren. Bezogen auf die TecSa umfasst dies die Definition und Qualifizierung der Extraktion, der verwendeten Filter sowie der Analyseverfahren. Zudem ist festzulegen, ob die Umgebungssauberkeit in die Messung mit einbezogen werden soll und an welchen Messpunkten im Wertstrom das Bauteil, einzelne Komponenten sowie die Umgebung gemessen werden soll. Dabei kann es sinnvoll sein Filter in Reinigungsverfahren bspw. bei der Luftreinigung zu analysieren. Die Reinigung wirkt hier analog der Extraktion und lässt Schlüsse auf signifikante Partikel vor und nach dem Messpunkt zu.

Für die Analyse der Umgebungssauberkeit kann als Alternative zur Berechnung des Illig-Wertes nach VDA 19.2 das in Kapitel 4.2.1.4 entwickelte Vorgehen herangezogen werden. Durch eine

Übertragung der Ergebnisse in ein Raster der Fertigungsumgebung können hier schnell Quellen kritischer Partikel (Partikelgröße > Grenzwert bzw. Ergebnisse gravimetrischer Untersuchungen > Grenzwert) identifiziert werden.

Analysen der Umgebungssauberkeit sollten dabei nicht nur in der Halle (Sekundärumgebung) sondern auch in der direkten Umgebung (Primärumgebung) des Bauteils erfolgen (Abbildung 5). Nur auf diese Weise lassen sich Partikel identifizieren, die durch Kinematiken in der Maschine erzeugt oder durch Aufwirbelungen auf das Bauteil verschleppt werden.

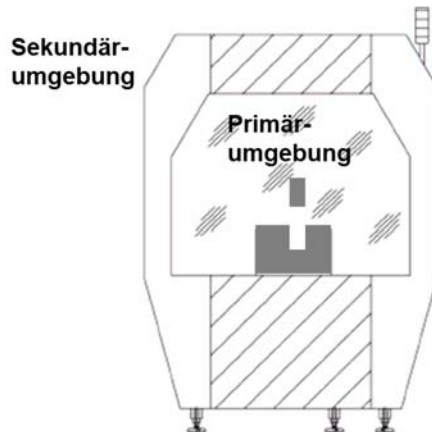


Abbildung 5: Primär- und Sekundärumgebung eines Bauteils am Beispiel einer Maschineneinhausung

Bei der Verwendung der Standard-Sauberkeitsanalyse mit Lichtmikroskop kann zur Metall/Nichtmetall-Klassifikation das in Kapitel 4.5.2 beschriebene Vorgehen verwendet werden. Darüber hinaus dienen die erzeugten Partikelbilder sowie die entsprechenden Partikelmerkmale ($Feret_{max}$, $Feret_{min}$, metallisch, nichtmetallisch) zusammen mit den Produkt- und Prozessketteninformationen der Define-Phase als Eingangsinformationen für die Analyse-Phase.

- **Analyse-Phase**

Die Analyse-Phase untersucht einerseits die Ursachen und Auslöser von Verschmutzungen basierend auf den Ergebnissen der Measure-Phase. Andererseits werden in der Analyse-Phase die Verschleppungspfade von Verschmutzungen zu den kritischen Bauteiloberflächen ermittelt. Gemäß dem Grundsatz „von innen nach außen“ werden zunächst durch eine Analyse der Partikelquellen die Entstehungsursachen für Partikel ermittelt. Die in der Measure-Phase akquirierten Bilddaten werden eingesetzt, um die Partikel im metallisch und nichtmetallisch zu klassifizieren und anschließend anhand des erstellten Partikelkatalogs den Entstehungsursachen zuzuordnen. Sollten die Partikel nicht eindeutig zugeordnet werden können, sind die Ergebnisse mit Wertstromexperten und anhand zusätzlicher Informationen zu plausibilisieren. Der Abgleich der Partikelbilder erfolgt derzeit noch manuell, ist jedoch in weiterführenden Forschungsarbeiten durch den Einsatz von Deep Learning Verfahren zu automatisieren.

Können Partikel keiner Ursache zugeordnet werden, können diese anhand der entwickelten Mustererkennung (Kapitel 4.5.1.1) gruppiert werden. Dies dient als Grundlage für zukünftige Expertenbefragungen oder gezielte Prozessuntersuchungen. Letztere können durch den Einsatz der in Kapitel 4.2.1.3 entwickelten Modellierung von Verschleppungspfaden sowie durch die Messung der Partikelfracht auf Bauteilen nach bestimmten Wertschöpfungsstufen erfolgen. Die

Ergebnisse dieser Untersuchungen ergänzen als neue Klasse den Partikelkatalog. Ein weiterer Vorteil der Analyse der Partikelbilder ist die Identifikation von Prozessabweichungen. So lassen sich bei einer entsprechenden Datenbasis schnell unbekannte Partikel erkennen, die dann auf bewusste oder unbewusste Änderungen des Prozesses zurückzuführen sind. Die Grundlage dafür bilden technologisch und organisatorisch spezifizierte Prozessabläufe. Durch die Ergebnisse der Analysephase in Form von Partikelquellen sowie Verschleppungspfaden können in der Improve-Phase gezielt Verbesserungen abgeleitet werden.

- **Improve-Phase**

In Anlehnung an die Definition der TecSa, als Abwesenheit unerwünschter Materie, können drei grundsätzliche Verbesserungsstrategien abgeleitet werden. Während durch die Bauteilreinigung kritische Verschmutzungen aktiv von der Bauteiloberfläche entfernt werden, können durch entsprechende Vermeidungsmaßnahmen die Entstehung oder das Verschleppen von Verschmutzungen auf kritischen Oberflächen vermieden werden. Ferner kann durch das Aufweiten der SGW, bspw. durch eine robustere Konstruktion, ein Bauteil bei gleichen Rahmenbedingungen als technisch sauber bewertet werden. Die Aufgabe bei der Gestaltung sauberkeitssensibler Wertschöpfungsketten besteht darin, diese drei grundsätzlichen Strategien aufeinander abzustimmen, sodass die Erzeugung der TecSa durch zielgerichtete Maßnahmen wirtschaftlich dargestellt werden kann.

Insgesamt können folgende Strategien zur Erzeugung technisch sauberer Produkte herangezogen werden. Die gewählte Abfolge der Beschreibung richtet sich nach der Priorität der Maßnahmen bei der Verbesserung sauberkeitssensibler Produktionssysteme. Die Planung und Umsetzung dieser Maßnahmen sollte dabei jedoch stets mit einer Prüfung von Alternativen hinsichtlich deren Auswirkungen auf die Kostenstruktur sowie deren Einfluss auf die Leistung (Durchsatz, Durchlaufzeit) des Wertstroms erfolgen.

- Verschmutzungen tolerieren

Da mit zunehmenden Anforderungen an die TecSa die Produktionskosten exponentiell ansteigen, gilt es zunächst zu prüfen, ob die definierten Sauberkeitsanforderungen tatsächlich technologisch gerechtfertigt sind. Ferner ist zu untersuchen, ob diese Anforderungen generell für das gesamte Bauteil gelten müssen oder eine partielle Belegung von Oberflächen mit SGW sinnvoll ist, wenn eine Verschleppung in kritische Oberflächen vermieden bzw. ausgeschlossen werden kann.

Ferner ist die Art der Messung zu hinterfragen. Werden hier Flächen geprüft, die nicht Gegenstand der Sauberkeitsspezifikation sind, kommt es zu Messfehlern. Dies kann zu einer Einordnung des Bauteils als nicht technisch sauber führen. Aus diesem Grund ist die präzise Abstimmung der Prüfprozedur in der Measure-Phase von höchster Priorität.

Ferner sollte der Grundsatz von „innen nach außen“ im Fokus der Verbesserung stehen. Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren Verbesserungsaktivitäten häufig auf die Umgebung und auf Lieferantenbauteile fokussiert. Diese Maßnahmen führen nicht zur Erreichung der geforderten SGW, wenn nicht sichergestellt werden kann, dass in den

Transformationsprozessen des Hauptwertstroms keine kritischen Verschmutzungen entstehen bzw. diese nicht beseitigt werden. Dabei ist zu prüfen, ob Verschmutzungen die als „unkritisch“ eingeordnet werden, die Haftung von Partikeln auf der Bauteiloberfläche fördern.

- Ursachen vermeiden

Anhand der in der Measure-Phase erzeugten Partikelbilder kann zusammen mit dem Partikelkatalog auf Entstehungsursachen von Partikeln geschlossen werden. Sind diese Ursachen, resp. Mechanismen bekannt, können zusammen mit Prozessexperten und Technologen Verbesserungsansätze definiert werden. Die Verbesserungsansätze zielen dabei auf die Fertigung, Montage und Logistik ab. So lassen sich, wie im Stand der Technik aufgezeigt, beim Urformen und Trennen bspw. durch die Wahl bzw. die Überarbeitung geeigneter Werkzeuge, durch konstruktive Änderungen an Bauteilen und Ressourcen oder durch alternative Bahnplanung beim Trennen Verbesserungen erzielen.

Im Rahmen der Montage können durch den Einsatz alternativer Fügeverfahren oder durch andere Beschichtungen, bspw. auf Schrauben, Verschmutzungen vermieden werden. Im Bereich der Logistik können durch geeignete Werkstoffe der Verpackung und den Einsatz von Gefachen der Abrieb zwischen Bauteilen sowie zwischen Bauteil und Verpackung vermieden werden.

- undefiniertes Ablösen vermeiden

Ein Partikel wird dadurch zum Partikel, dass sich ein Teil der Oberfläche eines Bauteils, eines Werkzeugs oder einer anderen Ressource ablöst, das im Vergleich zum Substrat ein geringes Volumen besitzt sowie unerwünscht ist. Eine wichtige Ursache für Partikel sind Grate aus dem Urformen oder dem Trennen, die sich undefiniert ablösen. Lässt sich bspw. die Gratentstehung als Ursache nicht gänzlich vermeiden, sollten Verbesserungen auf das undefinierte Ablösen fokussieren. Dies kann entweder durch entsprechende Entgratstrategien erfolgen oder durch die Analyse von Vorrichtungen in der Fertigung auf Gratablösung mit anschließender Verschleppung. Darüber hinaus bestehen Fügeverfahren bei denen Ursache und Auslöser miteinander einhergehen. Insbesondere das Schweißen, Löten, Einpressen, Verstemmen oder Verschrauben sind kritische Prozessschritte, an denen eine Partikelentstehung beobachtet werden kann. Sind diese Prozesse nicht ersetzbar und lassen sich auch nach Verbesserungsmaßnahmen kritische Partikel nicht vermeiden, so sollte die Verschleppung entstehender Partikel in kritische Bauteilbereiche vermieden werden.

- Verschleppung auf kritische Oberflächen vermeiden

Anhand der Modellierung der Verschleppungspfade wurden diese in der Analyse-Phase visualisiert. Die Verschleppungen unterliegen dabei folgenden Mechanismen:

- Schwerkraft bzw. ballistische Übertragung über die Luft oder im Bauteil
- Übertragung von Partikeln durch Anhaftung an Ressourcen (Werkstückträger, Greifer, Handschuh, Behälter, Antriebe)
- Übertragung von Partikeln durch verschmutzte Komponenten

- Strömung oder Aufwirbelung von Medien (Luft, KSS, Reinigungsmedium in strömungstechnisch ungünstigen Geometrien)

Um Verschleppungen zu vermeiden, können je nach Distanz zwischen Partikelentstehung und kritischer Oberfläche unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden. Ziel ist es, mindestens eine Kante im Modell zu beeinflussen, sodass die Übertragung der Verschmutzung verhindert wird. Alternativ ist die gezielte Reinigung von Bauteilen oder Ressourcen auf dem Verschleppungspfad vorzunehmen. Die Verschleppung innerhalb des Bauteils kann bspw. durch das Schreiben in Sacklöcher oder durch eine strömungstechnisch günstige Auslegung erreicht werden.

Im Bereich der Logistik sollte es eine organisatorische Trennung zwischen Bereitstellung und Montage bzw. Endkontrolle und Nutzung von Mehrwegverpackungen geben. Dabei sind Bauteilbereiche zu definieren, die zum Handling bzw. zur Manipulation genutzt werden können. Zudem kann durch eine entsprechende Orientierung der Bauteile (Öffnung nach unten) eine Verschleppung in das Bauteil vermieden werden. Darüber hinaus ist durch die Einführung von Schleusen, Raumkonzepten und mehreren Verpackungsschichten (sog. Zwiebschalenprinzip) eine Entkopplung von Bauteil und Umgebung vorzunehmen.

- Reinigung bzw. Haftung vermeiden

Als abschließende Maßnahme kann die Haftung zwischen Verschmutzung und Bauteiloberfläche reduziert werden. Hier bieten sich die in Kapitel 4.3 fokussierte Auswahl und Integration von Reinigungsanlagen an. Ferner kann durch das Spülen mit KSS eine Entfernung der Partikel erreicht werden. Dabei betrifft die Reinigung nicht ausschließlich Bauteile sondern umfasst auch die Fertigungs- und Logistikressourcen. Insbesondere im Bereich der Mehrwegverpackungen ergeben sich vielfältige Fragestellungen, die hier weiteren Forschungsbedarf aufzeigen. Diese fokussieren dabei Fragestellungen wie die Ableitung von SGW, die geeignete Reinigung oder die entsprechende Sauberkeitsanalyse.

- **Control-Phase**

Im Rahmen der Control Phase kann durch den Einsatz des Partikelkataloges und der Verfahren der Mustererkennung die Wirkung einzelner Maßnahmen anhand spezifischer Partikel überprüft und gesteuert werden. Somit dient die Control-Phase nicht mehr nur dem klassischen Reporting der Partikelgrößenverteilung sondern ist Ausgangspunkt für eine weitere Iteration des Regelkreises der TecSa auf Wertstromebene. Darüber hinaus dienen die Ergebnisse der Control-Phase als Input für Regelkreise auf höheren Dekompositionsebenen mit dem Ziel der Standardisierung.

3. Literatur

1. Adams H-N, Jelinek TW (1999) Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie. Leuze, Saulgau/Württ.
2. Azra Martin Ü (2011) Störungseinflüsse von Partikeln auf die Funktion von Hochdruckbauteilen. Diss.
3. Bölte A (1994) Modelle und Verfahren zur innerbetrieblichen Standortplanung. Physica-Schriften zur Betriebswirtschaft, Bd 48. Physica-Verlag HD, Heidelberg
4. Deuse J, Krebs M, Droste M, Doehrer K (2008) Bauteilreinigung im Wertstrom. Handhabungskonzepte für die Integration von Vibrationsreinigungsanlagen in die kontinuierliche Fließfertigung. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103(9):598–601
5. DIN EN ISO 9001:2015 (2015) Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Beuth Verlag
6. Dressler J, Rapp A (2006) Prüfung der technischen Sauberkeit. Prozess- und zeitnahes Monitoring. JOT - Journal für Oberflächentechnik 46(7):48–51
7. Eichhorn F (2015) Technische Sauberkeit. Steigendes Qualitätskriterium, 1. Aufl. AV Akademikerverlag, Saarbrücken
8. Emmrich S (2012) Meeting Critical Cleaning Challenge. Products Finishing
9. Gail L, Gommel U, Hortic H-P (Hrsg) (2012) Reinraumtechnik, 3. Aufl. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
10. Gropp O (2014) Technische Sauberkeit. In: Lang K-D (Hrsg) Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL, Düsseldorf, S 186–190
11. IATF 16949 Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie, 2016. Aufl
12. Inst. of Environmental Sciences and Technology (1994) Military Standard 1246C: Product Cleanliness Levels and Contamination Control Program. Redstone Arsenal
13. Kloke U (2003) Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems, TU Dortmund
14. Klumpp B (1993) Prüfverfahren zur Untersuchung der Partikelreinheit technischer Oberflächen. IPA-IAO-Forschung und -Praxis, Bd. 182. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest
15. Koblenzer G (2016) Projektierung und Auslegung von reinigungstechnischen Verfahren. Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) des IGF-Vorhaben Nr. 19110 N / 1 mit dem Titel Bauteilreinigungskonzepte effizient gestalten und bewerten., Dortmund
16. Kohli R, Mittal KL (2008) Fundamentals and applied aspects. Developments in surface contamination and cleaning, vol. [1]. William Andrew, Norwich, NY
17. Kreck G, Holzapfel Y (2013) Reinheitsvalidierung von kontaminationskritischen Produkten. reinraum online 01-2013
18. Läßle R (2009) Mit steigender Präzision wird die Sauberkeit wichtiger. Saubere Produkte leben länger. Quality Engineering (5):26–29
19. LPW Reinigungssysteme GmbH (2012) Fragebogen. http://www.lpw-reinigungssysteme.de/cms/fileadmin/Download/Fragebogen/lpw_reinigungssysteme_fragebogen_de.pdf

20. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016) Manual 1.0. <https://www.lpw-reinigungssysteme.de/data/uploads/manual/LPW-Handbuch.pdf>. Zugegriffen: 04. September 2018
21. Mast Jd, Lokkerbol J (2012) An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics* 139(2):604–614. doi:10.1016/j.ijpe.2012.05.035
22. Rochowicz M (2010) Filterzentrifuge zur gravimetrischen Analyse von Partikeln in Suspensionen, Universität Stuttgart
23. Rochowicz M (2011) Zehn Jahre Technische Sauberkeit. Steile Karriere einer Qualitätsgröße. *JOT - Journal für Oberflächentechnik* 51(Special Industrielle Teilereinigung):5–7
24. Rochowicz M (2018) Elektromobilität und Technische Sauberkeit. *Journal für Oberflächentechnik* 2018(Sonderheft):10–14
25. Rochowicz M, Schmauz G (2010) Neues Rund um die Technische Sauberkeit. Restschmutz als Qualitätsindikator. *Journal für Oberflächentechnik* (3):54–56
26. Schmauz G (2011) Folgen von Sauberkeitsvorgaben für die Weiterverarbeitung. In: Westkämper E, Verl A (Hrsg) *Technische Sauberkeit für Entwickler und Konstrukteure*. FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, Stuttgart, S 50–62
27. Schmitt R, Pfeifer T (2015) *Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken*, 5. Aufl. Hanser, Carl, München
28. Schuba C (2017) *Prospektive Investitionskostenermittlung für die Motorenproduktion in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses (Schriftenreihe Industrial Engineering)*. Diss., TU Dortmund
29. Schulz D (2006) Einfluss der Logistik auf die Reinheit von Werkstücken. Wie sauber kommen Teile zum Kunden? *JOT. Journal für Oberflächentechnik* 46(4):18–19
30. Schulz D (2012) Effizient und umweltgerecht reinigen mit Lösemittel. *Technica* (9):48–49
31. Schweinstig S (2012) *Technische Sauberkeit in der Refabrikation. Fortschritte in Konstruktion und Produktion*, Bd. 24. Shaker, Aachen
32. Verband der Automobilindustrie e. V. (2010) *VDA 19.2: Technische Sauberkeit in der Montage Teil 2. Umgebung, Logistik, Personal und Montageeinrichtungen (VDA 19.2)*. HenrichDruck+Medien GmbH, Frankfurt
33. Verband der Automobilindustrie e. V. (2015) *VDA 19.1: Prüfung der Technischen Sauberkeit - Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile*, 2. Aufl (VDA 19.1)
34. Wegener K, Schliesser J (2004) Nur sauber oder wirklich rein? *JOT - Journal für Oberflächentechnik* 44(3):62–65
35. Wenzel P, Costerousse D (2018) *Technische Sauberkeit im Produkt- Entstehungs- Prozess (PEP)*. Fachtagung Technische Sauberkeit, Leipzig
36. Westkämper E, Verl A (Hrsg) (2011) *Technische Sauberkeit für Entwickler und Konstrukteure*. Fraunhofer IPA-Seminar. FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, Stuttgart
37. Wildbrett G (2006) *Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie*, 2. Aufl. Behr, Hamburg
38. Wullstein M (2004) *Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen*, 1. Aufl. Maschinenelemente-Verl., Dortmund

39. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (2013) Leitfaden. Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik. Schmutz ist Materie am falschen Ort. Fachverband PCB and Electronic Systems, Frankfurt am Main
40. Zwinkau R, Müller P, Deuse J (2017) Untersuchung korrelierender Parameter bei der Reinigung mit ionisierter Luft in Fließlinien am Beispiel der Fertigung mechatronischer Baugruppen. JOT. Journal für Oberflächentechnik:5