



VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 36

Ressourceneffiziente Reinigungstechnologien



VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 36: Ressourceneffiziente Reinigungstechnologien

Autorin:

Mareike Carolin Taube, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken Dr. Enrico Fuchs, Gruppenleiter Reinigungstechnologien am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / KKulikov

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

**VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 36**

Ressourceneffiziente Reinigungstechnologien

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	9
Motivation und Zielsetzung	10
2 EINFÜHRUNG IN DIE INDUSTRIELLE REINIGUNG VON BAUTEILEN & PRODUKTIONSANLAGEN	11
2.1 Arten von Verunreinigungen	12
2.2 Grob-, Fein- und Feinstreinigung	16
2.3 Reinigungsmechanismen	18
2.4 Reinigungsmedien	20
2.5 Einflussfaktoren auf das Reinigungsergebnis	26
3 KMU-RELEVANTE REINIGUNGSVERFAHREN	28
3.1 Nasschemische Reinigung (Nassverfahren)	29
3.2 Strahlreinigung	32
3.3 Mechanische Reinigung	39
3.4 Thermische Reinigung	41
3.5 Manuelle Reinigung	44
3.6 Sonderreinigungsverfahren	45
4 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE INDUSTRIELLER REINIGUNGSPROZESSE	48
4.1 Ressourceneffizienzpotenziale der industriellen Bauteilreinigung	48
4.1.1 Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0	48
4.1.2 Ressourceneffizienz durch Überwachung der technischen Sauberkeit	55

4.1.3	Retrofitting bestehender Reinigungsanlagen	58
4.1.4	Ressourceneffizienz durch optimierte Prozessführung	60
4.2	Ressourceneffizienzpotenziale der industriellen Anlagen- und Rohrreinigung	61
4.2.1	Wärme- und Kühlkreislauf	61
4.2.2	Erzeugung von Prozessdampf	64
4.2.3	Behälterreinigung	65
4.2.4	Ressourceneffiziente Anlagenreinigung durch automatisierte CIP-Prozesse	68
4.2.5	Rohrreinigung	70
5	LEITFADEN – AUSLEGUNG EINER RESSOURCENEFFIZIENTEN REINIGUNGSANLAGE	72
5.1	Bestandsaufnahme der zu erwartenden Verunreinigungen	72
5.2	Bestimmung der Reinigungsanforderungen	74
5.3	Auswahl passender Reinigungstechnologien	74
5.4	Konzeptionierung des Reinigungsprozesses	76
5.5	Überwachungs- und Qualitätssicherungsmaßnahmen	79
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	82
	LITERATURVERZEICHNIS	86

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersicht des Aufkommens produktionsrelevanter partikulärer Verunreinigungen	12
Abbildung 2: Übersicht des prozentualen Aufkommens produktionsrelevanter filmischer Verunreinigungen	13
Abbildung 3: Relevante Oberflächenverunreinigungen bei industriellen Reinigungsprozessen	15
Abbildung 4: Schichtartiger Aufbau kontaminierter metallischer Bauteiloberflächen	16
Abbildung 5: Erweiterter Sinner'scher Kreis	27
Abbildung 6: Marktanteile der in Deutschland eingesetzten Reinigungsverfahren der industriellen Teilereinigung	28

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Verfahrenstechnische Auslegung von Reinigungsprozessen nach Durchsatz bzw. Sauberkeitsanforderung	77
------------	---	----

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AES	Augerelektronenspektroskopie
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CIP	Cleaning in Place
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KSS	Kühlschmierstoffe
OSEE	Optisch stimulierte Elektronenemission
Per	Perchlorethylen
PVAL	Polyvinylalkohol
SEM	Rasterelektronenspektroskopie
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Tri	Trichlorethylen
UV-Licht	Ultraviolettes Licht
TOC	Total organic Carbon
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

8 Abkürzungsverzeichnis

VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz
WDX	Wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie
XPS	Röntgenphotoelektronenspektroskopie

1 EINLEITUNG

Mit der Etablierung nachhaltiger und umweltfreundlicher Fertigungsprozesse rückt auch die industrielle Reinigung zunehmend in den Fokus der Prozessoptimierung. So bedeuten ressourceneffiziente Reinigungstechnologien nicht nur eine geringere Umweltbelastung, sondern bieten aus unternehmerischer Sicht ebenfalls Potenzial zur Kosteneinsparung. Für das produzierende Gewerbe bestehen bedeutsame Ressourceneffizienzpotenziale vor allem im Bereich der Bauteil- und Anlagenreinigung, z. B. (Produktions)Behälter, Rohrleitungen, Wärmeübertrager, aber auch seitens der Aufreinigung von Reinigungsmedien und Rückgewinnung abgereinigter Hilfs- und Betriebsstoffe.

Zum Erschließen dieser Potenziale steht produzierenden Unternehmen eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen zur Verfügung. So lässt sich z. B. durch das Retrofitting bestehender Reinigungsanlagen der Ressourcenverbrauch der Reinigung optimieren oder die Umwelt durch den Einsatz eines ökologischen Reinigers schonen. Über die Implementierung eines (innerbetrieblichen) Recyclingsystems lassen sich zudem Reinigungsmedien wie Spülwasser oder Reinigungskemikalien vollständig bzw. in Teilen zurückgewinnen. Ferner kann eine kontinuierliche Überwachung/Analyse ausgewählter Prozessparameter dazu beitragen, auch im Bereich der Prozessführung versteckte Ressourceneffizienzpotenziale zu identifizieren.

Vielversprechende Ansätze bestehen hier vor allem im Bereich der Digitalisierung und Automatisierung. So bieten die Integration digitaler Technologien wie Internet of Things (IoT), die Anwendung von künstlicher Intelligenz (KI), aber auch der Einsatz eines digitalen Zwillings erhebliches Potenzial zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs bzw. zur Steigerung der technischen Sauberkeit von Reinigungsprozessen. Für KMU können jedoch bereits Maßnahmen mit überschaubarem Investitionsaufwand wie die regelmäßige Wartung von Bestandsanlagen zur Lebensdauererhöhung oder auch die Implementierung eines Monitoringsystems zur Über-

wachung des Ressourcenverbrauchs einen erheblichen Mehrwert bedeuten.

Motivation und Zielsetzung

Ressourceneffiziente Reinigungstechnologien helfen, den Ressourcenverbrauch von industriellen Reinigungsprozessen zu reduzieren, während gleichzeitig optimale Reinigungsergebnisse erzielt werden. Durch die Entwicklung bzw. Anwendung ressourceneffizienter Reinigungstechnologien sind Unternehmen nicht nur in der Lage, ihre Produktionskosten langfristig zu senken, sondern sie leisten gleichzeitig einen positiven Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz, indem sie das Abwasser- bzw. Abfallaufkommen reduzieren sowie Energie und damit Emissionen einsparen.

Die vorliegende Kurzanalyse soll insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) dabei unterstützen, effektive und gleichzeitig kosteneffiziente Ansätze für die industrielle Reinigung zu entwickeln und erfolgreich umzusetzen. Zu diesem Zweck werden verschiedene KMU-relevante Reinigungstechnologien sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz für bestehende Reinigungsanlagen vorgestellt. Anhand von Gute-Praxis-Beispielen sollen KMU ferner dazu ermutigt werden, auch innovative Reinigungstechnologien zur Ressourceneinsparung in Erwägung zu ziehen. Der entwickelte Leitfaden zur Auslegung einer industriellen Reinigungsanlage soll Unternehmen außerdem dahingehend sensibilisieren, Ressourceneffizienz bereits in der Planungsphase einer Neuanlage zu berücksichtigen.

2 EINFÜHRUNG IN DIE INDUSTRIELLE REINIGUNG VON BAUTEILEN & PRODUKTIONSANLAGEN

Die technische Sauberkeit ist als die Abwesenheit funktionskritischer Verunreinigungen auf relevanten Funktionsflächen definiert¹. So ist eine saubere Oberfläche u. a. Grundvoraussetzung für den Erfolg von Oberflächenbehandlungen wie das Nitrieren oder Nitrocarburieren² und damit entscheidend für die spätere Produktqualität. Ebenso ist im Rahmen von Produktionsprozessen die Sicherstellung kontaminationsfreier Oberfläche, insbesondere bei wasserführenden Behältern und Rohrleitungen, ein wichtiges Kriterium für den störungsfreien Betrieb industrieller Anlagen und damit maßgeblich verantwortlich für die Produktivität eines Unternehmens.

Bei der industriellen Reinigung von Bauteilen und Produktionsanlagen sind Kenntnisse über die Art und Menge der zu entfernenden Verunreinigungen entscheidend, um die jeweiligen Sauberkeitsanforderungen nicht nur zu erreichen, sondern auch langfristig einzuhalten. Ferner sind Kenntnisse über die am Markt verfügbaren Reinigungstechnologien und -medien grundlegende Voraussetzung dafür, den finalen Reinigungsprozess optimal auf die jeweilige Situation abzustimmen. Nachfolgend werden relevante Oberflächenverunreinigungen vorgestellt und ein Überblick über die Arten (Grob-, Fein-, Feinstreinigung) und Wirkmechanismen (mechanisch, thermisch, chemisch) industrieller Reinigungsprozesse sowie die am Markt verfügbaren Reinigungsmittel (wässrige, lösungsmittelbasierte, feststoffbasierte Reinigung) gegeben. Ziel dieses Kapitels ist die Vermittlung erster Grundkenntnisse, um einerseits die Wirkung von Reinigungsprozessen nachvollziehbar zu machen und andererseits ein Grundverständnis für das Zusammenspiel der Reinigungsfaktoren (Temperatur, Chemie, Mechanik, Zeit) aufzubauen.

¹ Vgl. Holzapfel; Y. und Kreck G. (2013), S. 6.

² Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), S. A8.

2.1 Arten von Verunreinigungen

Der Begriff „Verunreinigung“ umfasst in der Reinigungstechnik alle Arten unerwünschter Fremdstoffe, die sich auf einer zu reinigenden Oberfläche befinden³. Verunreinigungen sind entweder partikulär oder treten in Form eines (organischen) Films auf.

Partikuläre Verunreinigungen

Der Begriff „partikuläre Verunreinigung“ beinhaltet alle Arten von Partikeln, die an der Oberfläche anhaften und die Funktionssicherheit eines Produkts in der Endanwendung, z. B. durch Blockaden oder erhöhten Verschleiß, negativ beeinträchtigen. Zu partikulären Verunreinigungen zählen bspw. Abrieb, Späne oder auch Strahlmittelrückstände⁴.

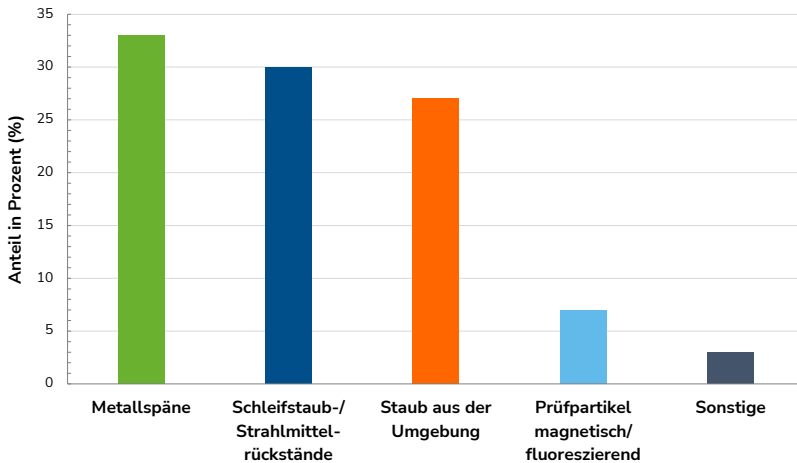


Abbildung 1: Übersicht des Aufkommens produktionsrelevanter partikulärer Verunreinigungen⁵

In Reinräumen (z. B. Herstellung von Computerchips) stellen überdies Staub, menschliches Haar, Hautschuppen oder auch Faserrückstände von

³ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

⁴ Vgl. Angerer, K.; Hohmann, A.; v. Seifert und Tammer, C. (2019), S. 16.

⁵ Eigene Darstellung auf Basis von mo – Magazin für Oberflächentechnik (2020).

Kleidung problematische Partikel dar⁶. Abbildung 1 zeigt das prozentuale Aufkommen produktionskritischer partikulärer Verunreinigungen in Fertigungsprozessen.

Filmische Verunreinigungen

Filmische Verunreinigungen treten in Form einer dünnen Schicht auf, welche sich über einzelne Areale, aber auch über die gesamte Oberfläche der zu reinigenden Komponente erstrecken kann. Filmische Verunreinigungen sind zumeist verfahrensbedingt, da es sich hier in der Regel um Öle, Fette, Tensid- oder andere Chemikalienrückstände handelt⁷.

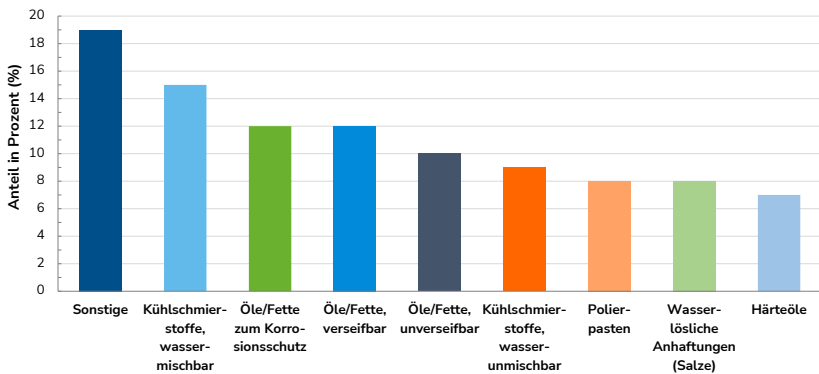


Abbildung 2: Übersicht des prozentualen Aufkommens produktionsrelevanter filmischer Verunreinigungen⁸

Filmische Verunreinigungen können jedoch auch durch eine Oxidation der Oberfläche hervorgerufen werden. Ebenso werden Fingerabdrücke, d. h. die Rückstände von Hautfetten, zu den filmischen Verunreinigungen gezählt⁹. Abbildung 2 zeigt das prozentuale Aufkommen produktionsrelevanter filmischer Verunreinigungen in Fertigungsprozessen.

⁶ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

⁷ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

⁸ Eigene Darstellung auf Basis von mo – Magazin für Oberflächentechnik (2020).

⁹ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

Organische Verunreinigungen (Biofilme)

Organische Verunreinigungen stellen in der Regel eine Kombination aus partikulärer und filmischer Verunreinigung dar. Zumeist handelt es sich um Mikroorganismen wie Bakterien, Algen oder Pilze, die in eine Schleimschicht eingebettet sind¹⁰. Liegt eine ungewollte großflächige Besiedelung einer Oberfläche durch besagte Mikroorganismen vor, spricht man von „Biofouling“. Ein derartiger Biofilm kann in Produktionsprozessen zu massiven betriebstechnischen und hygienischen Problemen führen¹¹.

In der Membrantechnik bewirken Biofilme z. B. eine Erhöhung des Reibungs-/Filterwiderstands, was sich wiederum negativ auf den Energiebedarf der Filtration sowie auf die Ausbeute und Qualität des Permeats niederschlägt. In Wärmeübertragern führen Biofilme aufgrund des erhöhten Reibungswiderstands nicht nur zu einem Anstieg des Energieverbrauchs, sie behindern auch den konvektiven Wärmetransport. Biofilme weisen zudem eine gewisse Leitfähigkeit auf, sodass ein entsprechender Bewuchs auf Steuer- und Regeleinheiten sogar Kurzschlüsse verursachen kann. Ein weiterer Schadmechanismus von Biofilmen ist die sogenannte „Biokorrosion“; hierbei wird die Werkstoffoberfläche durch Enzyme bzw. Stoffwechselprodukte des Biofilms angegriffen. Ebenso kann die Akkumulation von Salzen durch den Biofilm einen lokalen Anstieg des pH-Werts bewirken, sodass Verwitterungsprozesse wie Lochkorrosion begünstigt werden¹².

Biofilme auf Maschinen bzw. Anlagenkomponenten können zudem ein Gesundheitsrisiko darstellen, wenn gesundheitsschädliche Mikroorganismen oder deren Stoffwechselprodukte in das Produkt eingetragen werden¹³. Abbildung 3 zeigt die schematische Beschaffenheit von filmischen und partikulären Verunreinigungen sowie von Biofilmen.

¹⁰ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

¹¹ Vgl. Henning, K. (2016), S. 72.

¹² Vgl. Flemming, H.-C. (2020), S. 444, 446.

¹³ Vgl. Gümpel, P.; Kässer, M.; Eisenbeis, M. und Kreikenbohm, R. (2009), S. 1.

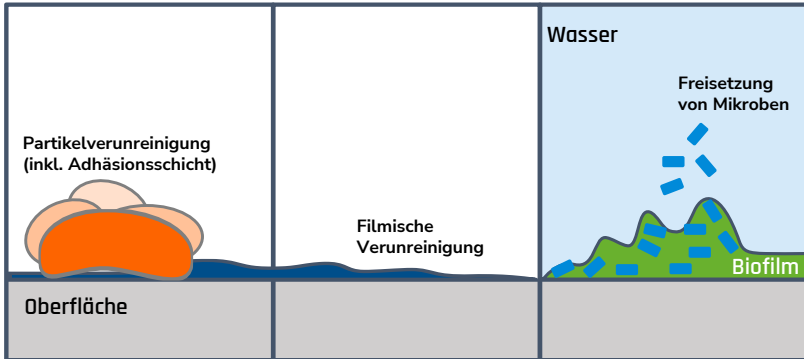


Abbildung 3: Relevante Oberflächenverunreinigungen bei industriellen Reinigungsprozessen¹⁴

Bei metallischen Bauteilen ist die Oberflächenkontamination wiederum schichtartig aufgebaut (vgl. Abbildung 4). Der Grundwerkstoff ist hier als Folge der mechanischen Bearbeitung umgeben von einer verformten Grenzschicht ($D > 1 \mu\text{m}$). An diese Schicht grenzt die sogenannte Reaktionsschicht ($D = 1 - 10 \text{ nm}$) an. Die Zusammensetzung dieser Schicht kann je nach Fertigung und der hierbei eingesetzten Additive bspw. aus Phosphorverbindungen/Metallsulfiden bestehen. In der Regel handelt es sich hierbei jedoch um Metalloxide. An die Reaktionsschicht schließt sich die sogenannte Adsorptionsschicht ($D = 0,1 - 10 \text{ nm}$) an. Diese Schicht weist aufgrund von Chemisorption hohe Bindungskräfte auf. Mit steigendem Abstand zur Bauteiloberfläche geht diese Bindung jedoch in eine Physisorption über, sodass sich die Bindungskräfte sukzessive abschwächen. Auf die Sorptionsschicht folgt zuletzt die eigentliche Kontaminationsschicht ($D > 1 \mu\text{m}$), bestehend aus Fertigungsrückständen wie Fetten, Ölen, Waschmittel, Spänen oder Staub¹⁵.

¹⁴ Eigene Darstellung auf Basis von Verband der Automobilindustrie e.V. (2004), S. 24, RJI Micro & Analytic GmbH (2024) sowie Grefkes, M. (2020).

¹⁵ Vgl. Haase, B. (1996), S. 4 f.



Abbildung 4: Schichtartiger Aufbau kontaminierter metallischer Bauteiloberflächen¹⁶

2.2 Grob-, Fein- und Feinstreinigung

Für die effiziente Nutzung von Ressourcen ist die Wahl des passenden Reinigungsverfahrens entscheidend. Diese richtet sich neben der Art der Verunreinigung auch nach den jeweiligen Sauberkeitsanforderungen an das Produkt. So unterscheidet die industrielle Bauteilreinigung zwischen Verfahren der Grob-, Fein- und Feinstreinigung, die bei der Auslegung einer Reinigungsanlage zumeist in Kombination angewendet werden. Die Abstimmung bzw. Verschaltung der einzelnen Reinigungsstufen hilft, optimale Reinigungsergebnisse zu erzielen und gleichzeitig Kosten einzusparen, da unnötige Reinigungsschritte vermieden werden.

Grobreinigung

Die Grobreinigung stellt für gewöhnlich die erste Reinigungsstufe innerhalb der industriellen Bauteilreinigung dar. Ihre Aufgabe besteht darin, stark verschmutzte Komponenten ohne spezifische Reinheitsanforderung von filmischen bzw. partikulären Verunreinigungen zu befreien. Die

¹⁶ Eigene Darstellung auf Basis von Haase, B. (1996), S. 5.

Anlagenauslegung konzentriert sich bei der Grobreinigung vor allem auf ein robustes Anlagendesign sowie eine hohe Leistungsfähigkeit in Bezug auf den Schmutzaustrag. Ziel ist ein wirtschaftlicher Reinigungsprozess unter Einhaltung angemessener Standzeiten von Reinigungsbädern und Sicherstellung eines angemessenen Ressourcenverbrauchs (z. B. Reinigungsmittel, Energie). Die Grobreinigung ist in der Regel als einstufiger Reinigungsprozess konzipiert, zweistufige Reinigungen stellen hier eher eine Ausnahme dar. Auf den eigentlichen Reinigungsprozess folgt zumeist eine Bauteiltrocknung, um die nachfolgenden Reinigungsschritte vor Kreuzkontamination durch das bereits verunreinigte Reinigungsmedium zu schützen¹⁷.

Feinreinigung

Grob- und Feinreinigung treten in der industriellen Bauteilreinigung zumeist in Kombination auf. Als nachgelagerte Reinigungsstufe sind Feinreinigungsprozesse daher im Gegensatz zur Grobreinigung für einen geringeren Verschmutzungsgrad konzipiert. Die Auslegung einer Feinreinigungsanlage, inklusive Bauteiltrocknung, erfolgt demnach auf Basis konkreter Sauberkeitsanforderungen wie der maximal tolerierbaren Restschmutzmenge filmischer bzw. partikulärer Verunreinigungen auf der Bauteiloberfläche. So kann die Restschmutzmenge bei partikulären Verunreinigungen über den gravimetrischen Restschmutzanteil, bei filmischen Verunreinigungen wiederum über die optische Detektion mittels Fluoreszenz und einer anschließenden Auswertung der Intensität bestimmt werden. Zur Einhaltung der Sauberkeitsanforderungen stellen aber auch die strikte Trennung von Reinigungsmedien sowie deren Aufbereitung maßgebliche Faktoren dar, um die Verschleppung von Verunreinigungen und damit die Entstehung von Kreuzkontaminationen innerhalb des Reinigungsprozesses zu minimieren¹⁸.

¹⁷ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 10 f.

¹⁸ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 11 f.

Feinstreinigung

Die Feinstreinigung dient der Entfernung von Partikeln im Submikrometerbereich, welche die Oberflächeneigenschaften (z. B. Rauigkeit, Benetzbarkeit) bzw. die optischen, chemischen oder elektrischen Eigenschaften des Bauteils negativ beeinflussen. Innerhalb der industriellen Bauteilreinigung stellt die Feinstreinigung daher höchste Ansprüche an die Bauteilsauberkeit, sodass generell die Gefahr einer Kreuzkontamination besteht. Eine Reinigungsanlage mit Feinstreinigung ist folglich durch räumlich getrennte Reinigungsstufen mit vor- bzw. nachgelagerten Zwischenreinigungsstufen gekennzeichnet¹⁹.

2.3 Reinigungsmechanismen

Das eingesetzte Reinigungsverfahren ist auf den Grad der Verunreinigung abzustimmen. Ist die Reinigungsleistung bspw. zu schwach, können die Anforderungen an die Bauteilsauberkeit nicht erfüllt werden. Ist die Reinigungsleistung hingegen zu stark, kann die Bauteiloberfläche so sehr in Mitleidenschaft gezogen werden, dass das Produkt die Qualitätsanforderungen nicht mehr erfüllt. Im Rahmen dieser Kurzanalyse werden die für die industrielle Bauteilreinigung relevanten Reinigungsmechanismen nach der Art des Energieeintrags wie folgt unterteilt:

Mechanische Reinigung

Bei der mechanischen Reinigung werden die auf der Bauteiloberfläche vorhandenen Verunreinigungen durch den mechanischen Abrieb einer Schleif- oder Strahlbeanspruchung entfernt. Zu den mechanischen Reinigungsverfahren zählen demnach alle Strahl- und Schleifverfahren (z. B. Sandstrahlen oder Hochdruckreinigung)²⁰, Bürstverfahren, Kavitationsverfahren (z. B. Ultraschallreinigung), aber auch sämtliche

¹⁹ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 12.

²⁰ Vgl. Deixelberger, P.; Steiner, J.; Schabbauer, K.; Koglgruber, F.; Wrulich, H. und Fresner, J. (2010), S. 11.

Reinigungsverfahren, deren Reinigungswirkung auf Turbulenzen bzw. Bewegungen des Reinigungsmediums zurückzuführen ist²¹.

Thermische Reinigung

Bei der thermischen Reinigung wird zwischen thermisch reaktiven und thermisch nichtreaktiven Reinigungsprozessen unterschieden. Die thermisch reaktive Reinigung basiert auf der thermischen Zersetzung von Verunreinigungen durch Pyrolyse (Voraussetzung: Vorhandensein einer sauerstoffarmen Ofenatmosphäre) oder Oxidation. Zu den thermisch reaktiven Reinigungsverfahren zählen demnach alle Wärmebehandlungen, die in reaktiven Gasen oder mithilfe von Lasereinwirkung bei Prozesstemperaturen > 100 °C stattfinden²².

Die thermisch nichtreaktive Reinigung erfolgt bei Prozesstemperaturen von < 100 °C. Die Reinigungswirkung basiert hier weniger auf der thermischen Zersetzung der Verunreinigungen, sondern vielmehr auf einer Geschwindigkeitserhöhung der Reaktion/des Diffusionsprozesses. Beispiele für die thermisch nichtreaktive Reinigung sind u. a. die Dampffentfettung, aber auch Reinigungsbäder mit erhöhter Temperatur²³.

Chemische Reinigung

Bei der chemischen Reinigung werden vorrangig chemische Reinigungslösungen eingesetzt, um Verunreinigungen von der Oberfläche des Reinigungsgutes zu lösen und damit abzureinigen²⁴. Chemische Reinigungslösungen können sowohl in Form wässriger Lösungen, organischer Lösungsmittel als auch in Form von Laugen oder Säuren (Beizen metallischer Oberflächen)²⁵ vorliegen. Der Einsatz von überkritischem CO₂ zur Lösung

²¹ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 9.

²² Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 10.

²³ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 10.

²⁴ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

²⁵ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

und Entfernung von Oberflächenverunreinigungen stellt einen Spezialfall der chemischen Reinigung dar²⁶.

2.4 Reinigungsmedien

Für eine effiziente und ressourcenschonende Reinigung ist die Wahl des Reinigungsmediums entscheidend. Die industrielle Bauteilreinigung kann sowohl mit flüssigen Reinigungsmedien (nasschemische Reinigung) als auch mit festen Partikeln (Feststoffreinigung) erfolgen. Nasschemische Reinigungsprozesse können hierbei, je nach Reinigungsanforderung und Art der Verunreinigung, wasser- oder lösungsmittelbasiert²⁷ durchgeführt werden. Die Auswahl der Spülflüssigkeit richtet sich nach den häufigsten bzw. erwarteten Verunreinigungen²⁸ sowie grundsätzlich nach dem Prinzip: „Gleiches löst sich in Gleichem“. Demnach können polare Verunreinigungen wie Salze oder wasserbasierte Kühl- und Schmierstoffe nur in polaren Lösungsmitteln wie Wasser oder Alkohol, unpolare Verunreinigungen wie Wachse und Fette nur in unpolaren Lösungsmitteln wie Benzol oder Benzin gelöst und damit abgereinigt werden²⁹.

Wässrige Reinigung, neutral

Die Reinigung mit neutralen (pH-Wert: 7) wässrigen Lösungen ist insbesondere für Verunreinigungen geeignet, für deren Entfernung kein hohes Maß an chemischer Löslichkeit erforderlich ist (z. B. Chloride, Salze, organische oder partikuläre Verunreinigungen). So werden neutrale wässrige Lösungen bevorzugt in der Tauch-, Spritz- oder auch Ultraschallreinigung eingesetzt. Wässrigen Reinigungslösungen können Additive wie Tenside oder Builder in flüssiger/Pulverform zugesetzt sein, um die Reinigungswirkung bspw. durch verbesserte Benetzungseigenschaften zu erhöhen³⁰.

²⁶ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 10.

²⁷ Vgl. LPW Reinigungssysteme GmbH (2016), S. 15.

²⁸ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 414.

²⁹ Vgl. FiT Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2022).

³⁰ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 7 f.

Für die Spritzreinigung werden vor allem nicht schäumende anionische Tenside genutzt. Bei Bedarf ist auch der Einsatz von Korrosionsinhibitoren üblich. Neutralreiniger können ebenfalls zur Entfernung von Fettrückständen herangezogen werden, wobei ihre Reinigungswirkung im Vergleich zu alkalischen Reinigern geringer ist. Für die Entfernung oxidischer Verunreinigungen wie Zunder oder Rost sind wässrige neutrale Reiniger hingegen ungeeignet³¹.

Wässrige Reinigung, sauer

Saure wässrige Reinigungsmedien (pH-Wert < 7) werden vorwiegend zur Entfernung oxidischer Oberflächenverunreinigungen (z. B. Rost oder Zunder) von metallischen Komponenten eingesetzt. Je nach vorhandener Verunreinigung bzw. dem zu reinigenden Material werden Mineralsäuren (z. B. Schwefelsäure (H_2SO_4), Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO_3), Phosphorsäure (H_3PO_4), Flusssäure (HF), Chromsäure (H_2CrO_4)) oder organische Säuren wie Oxal- oder Essigsäure ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ bzw. $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) verwendet. Außerdem können dem Reinigungsmedium Tenside, Chelatbildner bzw. geringe Mengen wasserlöslicher Lösungsmittel (z. B. Alkohole oder Ester)³² zugesetzt sein³³.

Bei entsprechender Einwirkdauer sind saure wässrige Lösungen in der Lage, die meisten Materialien anzugreifen. So sollte z. B. nichtrostender Stahl weder chlorhaltigen Reinigungsmedien (z. B. Salzsäure) noch erhitzter Schwefelsäure längerer Zeit ausgesetzt sein. Auch Magnesium reagiert bereits empfindlich auf leicht saure Lösungen und sollte daher ebenfalls nicht mit chlorhaltigen Reinigungsmedien in Kontakt gebracht werden. Insbesondere bei Bauteilen aus Stahl oder Titan besteht bei der Reinigung mit wässrigen sauren Lösungen zusätzlich die Gefahr der Wasserstoffversprödung. Eine phosphorsäurehaltige Reinigungslösung kann metallischen Komponenten hingegen durch Bildung einer Phosphatschicht einen

³¹ Vgl. Santner, C. (2010), S. 81.

³² Vgl. Santner, C. (2010), S. 82.

³³ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 5.

gewissen Korrosionsschutz verleihen. Die saure wässrige Reinigung ist zudem für Bauteile aus Aluminium äußerst interessant, da diese bei der Reinigung mit alkalischen Reinigern bspw. sehr ätzanfällig sind. Neben entsprechender Schutzausrüstung der Mitarbeitenden beim Umgang mit insbesondere stark sauren wässrigen Lösungen, ist bei der Entsorgung bzw. Einleitung der gebrauchten Reinigungslösungen auf die Einstellung des pH-Wertes zu achten, um Gefahren für die Umwelt zu vermeiden³⁴.

Wässrige Reinigung, alkalisch

Alkalische wässrige Reiniger zählen zu den meistverwendeten Reinigungsmedien der Metallindustrie³⁵. Sie werden u. a. zur Entfernung von Kühlschmierstoffen (KSS), wasserlöslicher Farbe sowie fetthaltigen Verunreinigungen wie Fingerabdrücken oder Vaseline eingesetzt. Sie werden sowohl im Rahmen der Grob- und Feinreinigung als auch für die Feinreinigung angewendet. Alkalische wässrige Reinigungsmedien enthalten basische Komponenten (z. B. Natriumhydroxid, Kaliumhydroxid oder Ammoniak), die in Kombination mit Wasser eine sogenannte Lauge (pH-Wert: 8 – 14) bilden. Zur Verbesserung der Reinigungsleistung werden alkalischen Reinigern zumeist diverse Zusatzstoffe wie Tenside, Komplexbildner, Emulgatoren oder Inhibitoren (z. B. Silikate) zugesetzt. Inhibitoren haben die Aufgabe, die zu reinigende Komponente vor einem Angriff (z. B. Ätzung) durch das Reinigungsmedium zu schützen. Besagte Reinigungslösungen müssen daher sorgfältig von der Bauteiloberfläche entfernt werden, um eine negative Beeinträchtigung nachfolgender Oberflächenbehandlungen wie Beschichten oder Lackieren zu verhindern³⁶.

Alkalische wässrige Reinigungslösungen können so konzeptioniert sein, dass vorhandene Verunreinigungen (z. B. Ölrückstände) leicht vom restlichen Wasser z. B. mittels Filtration separiert werden können. Eine entsprechend aufgereinigte Reinigungslösung kann anschließend in den

³⁴ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 5 f.

³⁵ Vgl. Santner, C. (2010), S. 82.

³⁶ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 6.

Reinigungsprozess rezykliert werden. Alkalische wässrige Reinigungslösungen sind aufgrund des breiten Temperaturniveaus vielseitig einsetzbar, ein weit verbreitetes Anwendungsfeld ist z. B. die Reinigung nichtrostender oder unlegierter Stähle. Jedoch besteht aufgrund des erhöhten pH-Wertes bei einigen metallischen Werkstoffen wie bspw. Aluminium oder Kupfer die Gefahr einer Blitzkorrosion. Abhängig von ihrer Basizität kann bei der Einleitung einer alkalischen wässrigen Reinigungslösung in das kommunale Abwassernetz eine Korrektur des pH-Wertes erforderlich sein. Es ist beim Umgang mit alkalischen Reinigern aufgrund der ätzenden Wirkung daher grundsätzlich auf einen ausreichenden Arbeitsschutz zu achten. Ebenso ist sicherzustellen, dass von der Reinigungsanlage keine Gefährdung durch elektrischen Strom ausgeht. So sind aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit alkalischer wässriger Reinigungslösungen, insbesondere bei der Spritzreinigung und der Verwendung von Sprühnebeln, ausreichende Sicherheitsabstände zu stromführenden Komponenten einzuhalten³⁷.

Lösungsmittelbasierte Reinigung

Die lösungsmittelbasierte Reinigung wird vor allem zur Entfernung polarer Verunreinigungen (z. B. Fette, Öle) angewendet. Sie kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn die Reinigungswirkung wässriger Reinigungsverfahren nicht mehr ausreicht, um die gewünschten Sauberkeitsanforderungen zu erfüllen. Zu den bevorzugt eingesetzten Lösungsmitteln zählen neben nichthalogenierten Kohlenwasserstoffen vor allem chlorierte Verbindungen wie z. B. Trichlorethylen (Tri) oder Perchlorethylen (Per)³⁸ sowie modifizierte Alkohole (z. B. Aceton, Isopropanol, Methanol)³⁹.

³⁷ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 7.

³⁸ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

³⁹ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 4.

Teilereinigung ohne den Einsatz halogenierter Lösungsmittel

Ein deutscher Präzisionsdrehteilhersteller betreibt seit 2014 am Standort Wolfach eine Teilereinigungsanlage, die vollständig auf gesundheitsschädliche halogenierte Lösungsmittel verzichtet. Die Reinigung der Drehteile von Spänen, Öl und wässrigen Gleitschleifrückständen erfolgt hierbei in einer Vakuumkammer. Produktionsrückstände werden in drei aufeinanderfolgenden Reinigungsstufen durch die Kombination von modifizierten Alkoholen und wässrigen Reinigern vollständig entfernt. Durch die abschließende Behandlung mit modifiziertem Alkohol entfällt zudem die übliche energieintensive Trocknung der Drehteile⁴⁰.

Kohlenwasserstoffreiniger stellen in der Regel eine Mischung verschiedener unpolarer Kohlenwasserstoffe (Alkane, Cycloalkane, entaromatisierte Kohlenwasserstoffe) dar. Im Gegensatz zu chlorierten Lösungsmitteln verfügen diese lediglich über geringe wassergefährdende Eigenschaften. Sie sind jedoch sehr leicht entflammbar, sodass entsprechende Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen im Umgang mit besagten Substanzen zu treffen sind. Anders als chlorierte Lösungsmittel, welche lediglich in geschlossenen Anlagen verwendet werden dürfen, verfügen Kohlenwasserstoffreiniger über eine geringere Toxizität. Darüber hinaus können sie, anders als chlorierte Lösungsmittel, unter geringem Energieaufwand über Destillation zurückgewonnen und in den Reinigungsprozess rezykliert werden, sodass Ressourcen eingespart werden⁴¹.

Modifizierte Alkohole können sowohl von hydrophiler als auch lipophiler Beschaffenheit sein. Sie eignen sich demnach zur Entfernung unpolarer Verunreinigungen wie Fett- oder Ölrückständen, sie können aber auch eingeschränkt zur Abreinigung polarer Verunreinigungen (z. B. Emulsionen) verwendet werden. Modifizierte Alkohole verfügen zudem über eine hohe

⁴⁰ Vgl. Schreier, J. (20. März 2014).

⁴¹ Vgl. Santner, C. (2010), S. 84 f.

Materialverträglichkeit, sodass nahezu jedes Metall mit besagten Reinigungsmedien zuverlässig gereinigt werden kann⁴².

Feststoffbasierte Reinigung

Die Feststoffreinigung wird vor allem zur Entfernung von Rost, Farb- oder Lackrückständen⁴³, aber auch zur Oberflächenentfettung eingesetzt. Die Feststoffreinigung erfolgt vorzugsweise durch Strahlverfahren wie Sandstrahlen (Strahlmittel z. B. Quarz-, Korund- oder Granatsand) oder Trockeneisstrahlen. Hierbei wird das Strahlmittel z. B. durch einen Luft- oder Wasserstrahl beschleunigt und mithilfe einer Düse auf die zu reinigende Bauteiloberfläche gelenkt. Abhängig vom Strahlmittel kann die Reinigung sowohl für empfindliche Oberflächen (bevorzugtes Strahlmittel: CO₂) als auch bei starken Verschmutzungen (geeignetes Reinigungsverfahren: z. B. Sandstrahlen) eingesetzt werden⁴⁴.

Trockenentfettung von Bauteilen

Ein brandenburgisches Maschinenbauunternehmen hat ein wasserfreies Adsorptionsreinigungsverfahren auf Basis von Zeolith als mineralisches Adsorbens entwickelt. Die Trockenentfettung kommt hierbei ohne chemische Zusatzstoffe aus und benötigt im Gegensatz zu herkömmlichen Entfettungsverfahren keine energieintensiven Heiz- und Trocknungsprozesse. Da dieses Verfahren vollständig auf umweltschädliche Chemikalien verzichtet, ergeben sich auch geringere Kosten für die Entsorgung der Reinigungsrückstände. Durch die wasserfreie Technologie entfällt zudem die Notwendigkeit einer Abwasseraufbereitung, sodass zusätzlich Kosten eingespart werden^{45 46}.

⁴² Vgl. FiT Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2022).

⁴³ Vgl. Liu, W.; Zhang, B.; Li, M. Z.; Li, Y. und Zhang, H.-C. (2013), S. 645.

⁴⁴ Vgl. Habermacher, S. (2021).

⁴⁵ Vgl. bip technology GmbH (2024).

⁴⁶ Vgl. Gaube, D. und Finus, F. (2018).

2.5 Einflussfaktoren auf das Reinigungsergebnis

Der Erfolg eines Reinigungsprozesses hängt sowohl vom Reinigungsgut selbst als auch von der Wahl der Reinigungsparameter ab. So sind die Art und Menge der vorhandenen Verunreinigungen, aber auch die Geometrie bzw. Oberflächenbeschaffenheit der zu reinigenden Komponente entscheidend für die Gestaltung von Reinigungsprozessen. Der erweiterte Sinner'sche Kreis (vgl. Abbildung 5) beschreibt das Zusammenspiel dieser Faktoren und hilft, die Reinigungsparameter Temperatur, Reinigungschemie, Behandlungszeit und Energieeintrag optimal auf das Reinigungsgut abzustimmen.

Die Wirkung der einzelnen Reinigungsparameter auf vorhandene Verunreinigungen stellt sich anhand des erweiterten Sinner'schen Kreises wie folgt dar: Die Reinigungschemie (Tenside, Säuren/Laugen, Lösungsmittel, Oxidationsmittel, Komplexbildner, Emulgatoren, Enzyme etc.) löst Verunreinigungen von der Bauteiloberfläche, während die Reinigungsmechanik (mechanische Energie z. B. in Form von Reibung, Ultraschall)⁴⁷ dazu dient, die Haltekräfte der Verunreinigungen zu überwinden. Eine Erhöhung der Temperatur hilft neben einer Viskositätsverringerung bei wässrigen Reinigungsmedien, die Reaktionsgeschwindigkeit des Reinigungsprozesses zu erhöhen⁴⁸.

Der Zeitfaktor wirkt unterstützend auf die Reinigungswirkung der anderen Faktoren. So muss bei einer Verkürzung der Reinigungsdauer bspw. mit aggressiveren Reinigungsmitteln gearbeitet oder eine stärkere Reinigungsmechanik eingesetzt werden, um vergleichbare Reinigungsergebnisse zu erzielen⁴⁹.

⁴⁷ Vgl. Liu, W.; Zhang, B.; Li, M. Z.; Li, Y. und Zhang, H.-C. (2013), S. 645.

⁴⁸ Vgl. ReiTec Reinigungstechnik und -systeme GmbH (2024).

⁴⁹ Vgl. Miorini, T.; Buchrieser, V.; Buchrieser, N. und Enko, M. T. (2016), S. 18 – 20.

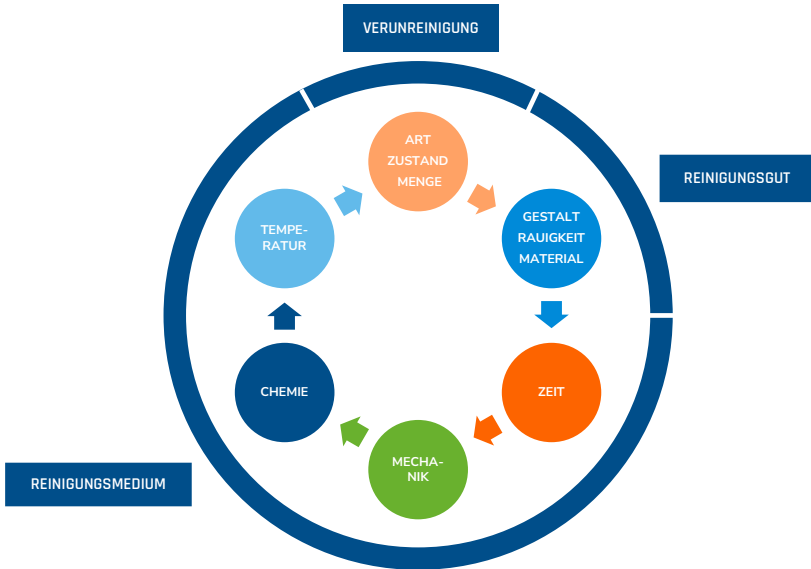


Abbildung 5: Erweiterter Sinner'scher Kreis⁵⁰

Durch die Anwendung des Sinner'schen Kreises sind Unternehmen des produzierenden Gewerbes somit in der Lage, Reinigungsprozesse effizienter zu gestalten, aber auch die Qualität der Reinigung zu steigern. Dies wirkt sich nicht nur positiv auf den Ressourcenverbrauch des Reinigungsprozesses, sondern ebenso auf die Produktqualität aus.

Nach der Vermittlung erster Grundkenntnisse zur Beschaffenheit von Oberflächenverunreinigungen sowie zu den grundlegenden Wirkmechanismen von Reinigungsprozessen widmet sich das nachfolgende Kapitel einer Einführung in KMU-relevante Reinigungsverfahren. Ziel ist es, Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes einen Einblick in den Stand der Technik zu geben und sie in die Lage zu versetzen, für jeden Anwendungsfall das effektivste und effizienteste Reinigungsverfahren zu identifizieren.

⁵⁰ Eigene Darstellung auf Basis von Dürr, H. und Wildbrett, G. (2006).

3 **KMU-RELEVANTE REINIGUNGSVERFAHREN**

Von den derzeit existierenden Reinigungsverfahren/-technologien sind vor allem die Nass- und Strahlverfahren für die industrielle Bauteilreinigung von Bedeutung. Abbildung 6 zeigt die in Deutschland am häufigsten eingesetzten Reinigungsverfahren nach Marktanteilen:

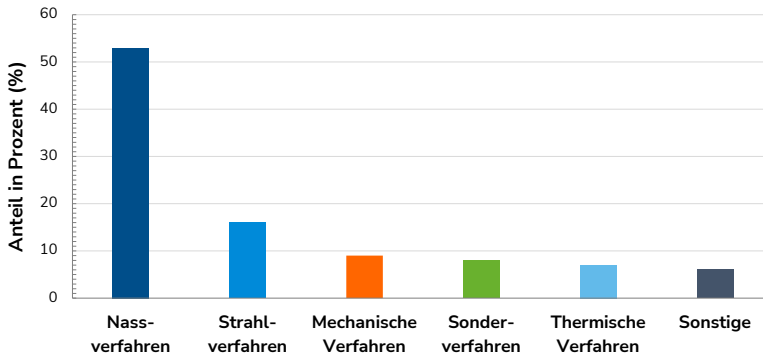


Abbildung 6: Marktanteile der in Deutschland eingesetzten Reinigungsverfahren der industriellen Teilereinigung⁵¹

Obwohl in Abbildung 6 der Gesamttrend für Deutschland (d. h. keine Unterscheidung nach Großunternehmen und KMU) dargestellt ist, wird im Rahmen dieser Kurzanalyse davon ausgegangen, dass alle der hier genannten Reinigungsverfahren ebenso KMU-relevant sind. Nachfolgend werden daher gängige Reinigungsverfahren zu den genannten Kategorien vorgestellt und es wird auf etwaige Besonderheiten zur Ressourceneinsparung eingegangen. Ziel dieses Kapitels ist demnach die Vermittlung eines Grundwissens über die am Markt verfügbaren Reinigungsverfahren, um Anwender*innen bei der Auswahl der geeignetsten Technologie bzw. deren erfolgreicher verfahrenstechnischer Umsetzung vor allem in puncto Ressourceneffizienz zu unterstützen.

⁵¹ Eigene Darstellung auf Basis von Fraunhofer Reinigung (2013), S. 2.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass einige der nachfolgend genannten Reinigungsverfahren grundsätzlich mehreren Kategorien zugeordnet werden können. Um Doppelnennungen zu vermeiden, stand bei der Eingruppierung der betroffenen Reinigungsverfahren daher vorrangig der Energieeintrag und weniger das eingesetzte Reinigungsmedium im Fokus. Eine Ausnahme stellen die Sonderreinigungsverfahren dar, welche eher als Nischenverfahren fungieren.

3.1 Nasschemische Reinigung (Nassverfahren)

Die nasschemische Reinigung ist das gängigste Verfahren innerhalb der industriellen Bauteilreinigung. Zur nasschemischen Reinigung werden z. B. die (Ultraschall-)Tauchreinigung sowie das Druckumfluten gezählt.

Tauchreinigung

Bei der Tauchreinigung wird das zu reinigende Bauteil/die zu reinigende Komponente in eine Reinigungslösung getaucht und anhaftende Verunreinigungen werden von der Oberfläche entfernt. Da die Verunreinigungen im Reinigungsmedium (gelöst/emulgiert) verbleiben⁵², kann für eine gleichbleibende Reinigungsleistung innerhalb des Reinigungsbad die Installation eines Ölabscheiders (Voraussetzung: Oberflächenverunreinigung in Form von Ölen/Fetten) sinnvoll sein. Zur Verbesserung der Reinigungsleistung kann die Charge im Reinigungsbad zusätzlich bewegt oder die Reinigungslösung umgewälzt werden. Die Tauchreinigung ist insbesondere für die Reinigung dichter Chargenpackungen sowie komplizierter Bauteilgeometrien geeignet. Tauchreinigungsanlagen sind in der Regel Teil einer mehrstufigen Prozessführung und werden z. B. in Kombination mit einer Spritzreinigung (vgl. Kapitel 3.2) eingesetzt⁵³. Die Tauchreinigung ist aufgrund der geringeren Wärmeverluste vor allem bei hohen

⁵² Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁵³ Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), S. A11.

Reinigungstemperaturen energetisch im Vorteil und daher auch in diesem Fall einer Spritzreinigung vorzuziehen⁵⁴.

Ultraschalltauchreinigung

Die Ultraschalltauchreinigung wird bevorzugt zur Abreinigung von Oberflächenverunreinigungen wie Öl, Fett, Rost oder Ruß eingesetzt. Hierfür werden die zu reinigenden Komponenten in einem Tauchbad positioniert und anschließend hochfrequenten Schallwellen ausgesetzt⁵⁵. Die Reinigungswirkung der Ultraschalltauchreinigung lässt sich vor allem auf die sogenannte Kavitation⁵⁶ bzw. auf die erosive Wirkung der Kavitationsblasen zurückführen, die in unmittelbarer Nähe zur Bauteiloberfläche kollabieren. Durch diese Kavitationsmechanismen werden die vorhandenen Verunreinigungen nicht nur gelöst, sondern gleichzeitig von der Bauteiloberfläche abtransportiert. Die Intensität des Ultraschalls ist an das zu reinigende Bauteil anzupassen. So benötigen bspw. präzisionsgefertigte Bauteile in der Regel höhere Ultraschallintensitäten als Bauteile mit weniger ausgeprägten Oberflächenstrukturen^{57 58}.

Die Ultraschalltauchreinigung zeichnet sich durch eine hohe Reinigungsleistung aus und ist dabei äußerst effizient, zeitsparend und oberflächenschonend. Es handelt sich zudem um eine vergleichsweise umweltfreundliche Reinigung, da gegenüber anderen nasschemischen Reinigungsverfahren weniger Wasser, Reinigungsmittel und Energie benötigt werden⁵⁹.

⁵⁴ Vgl. Santner, C. (2010), S. 64.

⁵⁵ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁵⁶ Vgl. Köchel, M.; Richter, A. und Sobotta, R. (2017), S. 608.

⁵⁷ Vgl. Strobel, J.; Bretz, N. und Lerch, R. (2006), S. 367.

⁵⁸ Vgl. Strobel, J. und Lerch, R. (2008), S. 453.

⁵⁹ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

Ultraschall-Reihentauchanlage zur Feinstreinigung optischer Bauteile für die Medizintechnik

Ein Hersteller von Präzisionsoptik für die Medizintechnik hat zur Endreinigung beschichteter Linsensysteme eine modulare Ultraschall-Reihentauchanlage mit sechs Reinigungs- bzw. Spülstufen errichtet. Die Reinigungsanlage verfügt über einen Transportautomaten, welcher die Ultraschalltauchreinigung eigenständig be- bzw. entlädt. Ferner enthält die Reinigungsanlage separate Module für die Zwischenreinigung bzw. Spülprozesse sowie für die Produkttrocknung. In Reinigungswanne eins und drei wird eine Ultraschallreinigung bei gleichzeitiger Drehbewegung des Reinigungsgutes (200 Umdrehungen pro Minute) durchgeführt. In Reinigungswanne zwei und vier erfolgt eine Zwischenspülung des oszillierenden Reinigungsgutes (500 Umdrehungen pro Minute) mit Osmosewasser. Anschließend durchläuft das Reinigungsgut eine zweistufige Feinstspülung (Wanne fünf und sechs, Wanne fünf zuzüglich Ultraschallreinigung) mit demineralisiertem Wasser, welches in Kaskade genutzt wird. Nach dieser Feinstspülung wird das Reinigungsgut durch Schleudern (1.500 Umdrehungen pro Minute) zunächst vor- und anschließend mit Warmluft vollständig getrocknet. Das jeweilige Reinigungsprogramm wird nach Einlesen eines auf der Charge aufgebrachten Barcodes ausgewählt. Informationen zur vorliegenden Charge sind über ein Bedienfeld der Reinigungsanlage einsehbar und können anschließend über eine PC-Schnittstelle ausgelesen werden. Die hier vorgestellte Reinigungsanlage zeichnet sich durch eine sehr gute Reinigungsleistung bei gleichzeitig hohem Durchsatz aus. Aufgrund der modularen Bauweise konnte sie sowohl kostengünstig als auch unter geringem Zeitaufwand technisch umgesetzt werden⁶⁰.

⁶⁰ Vgl. Schulz, D. (2023), S. 1.

Druckumfluten

Beim Druckumfluten wird das Reinigungsgut in einem abgeschlossenen Reinigungsbehältnis unter Druck mit dem flüssigen oder gasförmigen Reinigungsmedium umflutet. Durch die Druckeinwirkung (8 – 9 bar)⁶¹ ist das Reinigungsmedium in der Lage, selbst in feine Spalten der zu reinigenden Bauteiloberfläche vorzudringen und die dort vorhandenen Verunreinigungen effektiv zu lösen. Auf diese Weise wird selbst bei sehr komplexen Bauteilgeometrien bzw. dichten Chargenpackungen eine gründliche Reinigung gewährleistet. Das Druckumfluten wird daher insbesondere in Bereichen eingesetzt, wo hohe Anforderungen an die technische Sauberkeit gestellt werden (z. B. die Elektro- oder Luft- und Raumfahrtindustrie). Für optimale Reinigungsergebnisse, ohne eine Beschädigung des Reinigungsgutes, sind die Wahl des Reinigungsmediums sowie die Kontrolle der Druckatmosphäre essenziell⁶². So benötigt das Druckumfluten bspw. stark demulgierende Reiniger, welche zudem eine hohe Stabilität gegenüber Schäumen aufweisen müssen. Ferner ist bei der Reinigung öliger Oberflächen vor dem Ablassen der Waschlösung auf eine ausreichende Ölabscheidung zu achten, um der Gefahr einer Bauteilrückfettung entgegenzuwirken⁶³.

3.2 Strahlreinigung

Bei der Strahlreinigung wird das Reinigungsmedium mithilfe unterschiedlicher Strahlensysteme beschleunigt und der erzeugte Reinigungsstrahl anschließend auf die zu reinigende Oberfläche gerichtet⁶⁴. Die Verfahren der Strahlreinigung unterscheiden sich je nach verwendetem Reinigungsmedium bzw. Strahlensystem. Obwohl die kinetische Energie des Reinigungsmediums auch eine mechanische Reinigung des Reinigungsgutes bewirkt, wird die Strahlreinigung aufgrund ihrer verfahrenstechnischen Vielfalt im

⁶¹ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁶² Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁶³ Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), S. A11.

⁶⁴ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

Rahmen dieser Kurzanalyse als eigenständige Kategorie betrachtet. Nachfolgend sollen die gängigsten Strahlreinigungsverfahren vorgestellt werden.

Spritzreinigung

Bei der Spritzreinigung wird eine Reinigungslösung (in der Regel wässrige Reiniger, beim Einsatz von alkalischen und sauren Reinigern ist für die Mitarbeitenden eine entsprechende Schutzausrüstung obligatorisch)⁶⁵ mithilfe von Düsen auf die zu reinigende Oberfläche gespritzt, sodass vorhandene Verunreinigungen entweder durch die kinetische Energie des Spritzstrahls fortgespült oder durch die chemische Wirkung des Reinigungsmittels gelöst/emulgiert und damit entfernt werden⁶⁶. Hierfür wird die zu reinigende Komponente in einer Waschkammer so positioniert, dass die Bauteiloberfläche für den Spritzstrahl frei zugänglich ist. Die Spritzreinigung ist daher u. a. suboptimal für die Reinigung dichter Chargenpackungen⁶⁷. Die Spritzreinigung ist insbesondere bei großen Stückzahlen der Tauchreinigung vorzuziehen, da der schnellere Reinigungsprozess einen größeren Massendurchsatz erlaubt. Ferner liefert die Spritzreinigung bei fest anhaftenden Verunreinigungen ebenfalls ein besseres Reinigungsergebnis⁶⁸.

Bei der Gestaltung der Waschkammer ist insbesondere bei der Anzahl und Positionierung der Düsen (Seitenwände, Decke) die geplante Chargierung des Reinigungsgutes zu berücksichtigen. Ebenso wirkt sich die drehbare Gestaltung des Chargenaufnehmers bzw. der Spritzdüsen positiv auf den Reinigungserfolg der Spritzreinigung aus. Erfolgt die Reinigung zudem im Durchlaufverfahren, sind die Bauteile/-komponenten entsprechend einzeln auf dem Band anzuordnen. Auf diese Weise wird der Kontakt zwischen dem Spritzstrahl und der zu reinigenden Oberfläche zu jeder Zeit gewährleistet und es wird ein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis

⁶⁵ Vgl. Santner, C. (2010), S. 64.

⁶⁶ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁶⁷ Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), A11.

⁶⁸ Vgl. Santner, C. (2010), S. 64.

erzielt. Ausschlaggebend für eine optimale Reinigungsleistung ist jedoch die Einstellung eines hohen Volumenstroms. Die Reinigungseffizienz lässt sich sowohl durch die optimale Einstellung des Spritzdrucks und der Spritzstrahlrichtung als auch durch die Wahl der passenden Düsengeometrie erhöhen. Zur Gewährleistung idealer Betriebsbedingungen sind zudem regelmäßige Funktionsprüfungen der Anlage bzw. deren Komponenten obligatorisch⁶⁹.

Hochdruckwasserstrahlen

Bei der Wasserstrahlreinigung wird Wasser unter Druck (0,5 bis 150 bar) auf Bauteile oder Anlagenkomponenten gelenkt, um vorhandene Oberflächenverunreinigungen zu entfernen. Die Reinigungsanlagen können dabei mobil oder stationär betrieben werden⁷⁰. Es handelt sich zudem um eine sehr umweltfreundliche Reinigungsmethode, da weder Reinigungschemikalien noch andere umweltschädliche Substanzen eingesetzt werden. Die Wasserstrahlreinigung hat ein breites Anwendungsfeld, sie wird bspw. in der metallverarbeitenden Industrie, aber auch im Automotivebereich und in der Luftfahrt eingesetzt. Über die Veränderung von Druck und Temperatur kann die Reinigungsleistung des Wasserstrahls entsprechend den Reinigungsanforderungen angepasst werden. Die Wasserstrahlreinigung stellt somit eine sehr flexible Reinigungsmethode dar, die sowohl zur beschädigungsfreien Reinigung detailreicher Oberflächengeometrien als auch für die effektive Beseitigung grober Verunreinigungen geeignet ist⁷¹.

Druckluftstrahlen

Das Druckluftstrahlen kann sowohl trocken als auch unter Wasserbeimischung durchgeführt werden⁷². Beim trockenen Druckluftstrahlen durch-

⁶⁹ Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), A11.

⁷⁰ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁷¹ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁷² Vgl. Carreño-Olejua, R. (2014), S. 18 f.

strömt das Strahlmittel (z. B. Granatsand, Korund, Kunststoffgranulat oder Glasperlen) in einem Luftstrom eine Strahldüse und wird so auf annähernd Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Die Reinigungswirkung basiert hierbei auf dem abrasiven Effekt beim Auftreffen des Strahlmittels auf die zu reinigende Bauteiloberfläche⁷³. Beim sogenannten Nassstrahlen wird dem Druckluftstrahl vor dem Durchströmen der Strahldüse Wasser zugeführt, sodass ein Gemisch aus Luft, Wasser und Strahlmittel entsteht⁷⁴. Das Nassstrahlen ist vor allem aus gesundheitlicher Sicht von Vorteil, da die durch das Strahlen freigesetzten Stäube durch das Wasser gebunden werden⁷⁵.

Das Druckluftstrahlen ist vielseitig einsetzbar und erlaubt sowohl eine materialschonende als auch effiziente Oberflächenreinigung, die ebenso schwer zugängliche Stellen zuverlässig abreinigt. Wird das Strahlmittel nach dem Reinigungsvorgang zusätzlich aufbereitet, können Ressourcen eingespart und Abfälle vermieden werden. Ferner handelt es sich um ein vergleichsweise umweltfreundliches Verfahren, da keine aggressiven Reinigungschemikalien benötigt werden.

Schleuderstrahlen

Beim Schleuderstrahlen werden abrasive Partikel wie Strahlkies oder Glasperlen mit hoher Geschwindigkeit auf die zu reinigende Oberfläche geschleudert. Die Beschleunigung des Strahlmittels erfolgt dabei mithilfe in Rotation versetzter Schleuderräder, die mit entsprechenden Wurfschaukeln ausgestattet sind⁷⁶.

Die Reinigungswirkung des Schleuderstrahlens basiert auf dem Aufprallimpuls des Strahlmittels, welcher vorhandene Verunreinigungen absprengt. Das Schleuderstrahlen findet in geschlossenen Anlagen statt,

⁷³ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁷⁴ Vgl. Techpilot - DynamicMarkets GmbH (2022).

⁷⁵ Vgl. Sandstrahlerei Willfried Bräuer (2024).

⁷⁶ Vgl. Sandstrahlerei Willfried Bräuer (2024).

sodass eine konstant hohe Geschwindigkeit des Strahlmittels und damit ein gleichmäßiger Abtrag der Verunreinigungen gewährleistet ist⁷⁷.

Beim Schleuderstrahlen handelt es sich um eine sehr effiziente Reinigungsmethode, die vor allem zur Entfernung von Rost-, Farb- oder Lackresten von (metallischen) Oberflächen eingesetzt wird. Abhängig vom verwendeten Strahlmittel kann entweder eine sanfte (Strahlmittel: Glasperlen) oder eine stark abrasive Reinigung (Strahlmittel: Strahlkies) durchgeführt werden. Durch den kontrollierten Strahlprozess wird nicht nur eine hohe technische Sauberkeit erzielt, sondern es kann bei Bedarf gleichzeitig eine Aufrauung der Bauteiloberfläche erzeugt werden.

Das Schleuderstrahlen dient daher u. a. als Vorbereitung für nachfolgende Oberflächenbehandlungen, da bspw. Beschichtungen auf der gestrahlten Oberfläche eine höhere Haftung aufweisen. Während des Schleuderstrahlens ist die Freisetzung abrasiver Partikel jedoch nicht gänzlich vermeidbar, sodass Unternehmen für den Gesundheitsschutz ihres Personals entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen ergreifen müssen⁷⁸.

Wie das Druckluftstrahlen stellt auch das Schleuderstrahlen ein recht umweltfreundliches Verfahren dar, welches ohne den Einsatz aggressiver Reinigungskemikalien auskommt. Findet nach dem Reinigungsvorgang eine Aufbereitung des Strahlmittels statt, lässt sich auch hier Abfall vermeiden und der Ressourcenverbrauch weiter reduzieren.

Strahlen mit Kohlendioxid

Beim Strahlen mit Kohlendioxid werden feine Kristalle aus Trockeneis in einem Druckluft-/Gasstrom unter Einsatz einer Strahldüse beschleunigt und auf die Oberfläche der zu reinigenden Komponente gelenkt.

⁷⁷ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁷⁸ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

Das Reinigungsmedium wird hierbei entweder durch die Entspannung von flüssigem CO₂ (CO₂-Schneestrahlen) oder durch das Zermahlen von Trockeneisblöcken (Trockeneisstrahlen) erzeugt. Das CO₂-Strahlen stellt zudem ein vielseitig einsetzbares Reinigungsverfahren dar, da sich die Reinigungsintensität über den Druck des Beschleunigungsgases je nach Reinigungsanforderung variieren lässt⁷⁹.

Die Reinigungswirkung des CO₂-Strahlens weist sowohl einen mechanischen als auch thermischen Anteil auf. So verfügen die CO₂-Partikel aufgrund ihrer kinetischen Energie beim Auftreffen auf die Bauteiloberfläche über eine abrasive Wirkung. Aus der Temperaturdifferenz zwischen zu reinigender Oberfläche und Strahlmittel resultiert dagegen eine Versprödung der Verunreinigung. Aufgrund des unterschiedlichen Wärmekoeffizienten von Verunreinigung und Bauteiloberfläche treten zusätzliche Spannungen auf, die letztlich eine Absprengung der Kontamination bewirken.

Die entfernten Verunreinigungen werden anschließend mit dem Druckluft-/Gasstrom von der Bauteiloberfläche abtransportiert. Das Strahlen mit Kohlendioxid beinhaltet ferner ein geringes Abfallaufkommen, da die CO₂-Partikel nach dem Auftreffen auf die zu reinigende Oberfläche sublimieren und die Entsorgung von Strahlmittelrückständen somit entfällt⁸⁰.

⁷⁹ Vgl. Ehricht, S.; Grimme, R.; Mack, O.; Meyer, M.; Raquet, M. und Zorn, C. (2019), S. 14 f.

⁸⁰ Vgl. Uhlmann, E.; Drieux, S. und Jaczkowski, R. (2017), S. 551 f.

Automatisches CO₂-Schneestrahlen von Kunststoffbauteilen

Ein mittelständisches Unternehmen aus Baden-Württemberg hat eine Schnellstrahltechnologie für eine materialschonende Bauteilreinigung entwickelt. Mit besagtem Reinigungssystem können nahezu alle technischen Werkstoffe von filmischen und partikulären Oberflächenverunreinigungen befreit werden. Derzeit wird diese Technologie vor allem in der Automobilindustrie für die vollautomatische Reinigung von Kunststoffbauteilen als Oberflächenvorbereitung für nachfolgende Lackier- und Beschichtungsarbeiten eingesetzt. Im Gegensatz zu den klassischen energieintensiven Nassreinigungsverfahren, welche eine mehrfache Abkühlung/Erwärmung des zu reinigenden Bauteils erfordern, erlaubt das entwickelte Trockenreinigungsverfahren eine äußerst energieeffiziente Reinigung mit gleichbleibend hoher Reinigungsqualität. Das Reinigungssystem lässt sich dabei platzsparend in die vorhandenen Lackierkabinen integrieren, sodass insgesamt niedrige Investitionskosten anfallen. Das Reinigungssystem kann zudem flexibel an die gewünschten Reinigungsanforderungen angepasst werden. So können je nach Kund*innenspezifikation entweder Einzeldüsen oder Düsenarrays zur Reinigung großer Flächen verbaut werden. Die Reinigungsparameter (Volumenstrom Druckluft/CO₂, Strahlzeit, Strahlwinkel, Bewegungsablauf) lassen sich zudem exakt an die vorhandene Bauteilgeometrie bzw. die gewünschte Reinigungsintensität anpassen. Das Reinigungssystem ist zudem Industrie 4.0.-fähig und kann über entsprechende Schnittstellen in die bereits vorhandene Anlagensteuerung integriert werden⁸¹.

⁸¹ Vgl. acp systems AG (2019).

3.3 Mechanische Reinigung

Die mechanische Reinigung kann sowohl manuell als auch maschinell durchgeführt werden. Nachfolgend wird die Bürstenreinigung als bedeutendster Stellvertreter der mechanischen Reinigung sowie das vergleichsweise junge Verfahren der Vibrationsreinigung näher erläutert.

Bürstenreinigung

Der Reinigungsmechanismus der Bürstenreinigung basiert auf der mechanischen Beanspruchung des Bürstenmaterials in Form von Reibung auf die vorhandene Oberflächenverunreinigung, wobei entweder die Bürste oder das zu reinigende Werkstück bewegt wird (z. B. Rotationsbewegung)⁸². Die Bürstenreinigung bietet vielseitige Einsatzmöglichkeiten im Bereich der industriellen Bauteilreinigung. Sie ermöglicht nicht nur eine effektive Reinigung kontaminierter Oberflächen, sondern spart auch Ressourcen ein, da sie ohne den Einsatz von Reinigungsmitteln und Wasser auskommt.

Die Bürstenreinigung ist insbesondere zur Entfernung fest anhaftender Materialien wie Farben, Lacke, Zunder oder Rost geeignet, aber ebenso lassen sich partikuläre Verunreinigungen effektiv entfernen. Die Bürstenreinigung kann entweder manuell erfolgen oder in eine automatisierte Reinigungsanlage integriert werden. Die einzelnen Bürsten sind aus Draht bzw. synthetischen Materialien wie Gummi oder Polyvinylalkohol (PVAL) gefertigt. Bürsten aus PVAL können zur Erhöhung der Reinigungsleistung zusätzlich mit Schleifkörnern imprägniert sein. Neben der Grobreinigung von Oberflächen kann die Bürstenreinigung ebenfalls zur Feinstreinigung im Rahmen ultrareiner Anwendungen (z. B. Halbleiterindustrie) eingesetzt werden⁸³, wobei das Bürstenmaterial hier eher eine Reinigung in Form von Wischen ausführt⁸⁴.

⁸² Vgl. ReiTec Reinigungstechnik und -systeme GmbH (2024).

⁸³ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 9.

⁸⁴ Vgl. Santner, C. (2010), S. 65.

Automatisierte Trockenreinigung unter Einsatz von Stickstoff

Ein in Rheinland-Pfalz ansässiges Maschinenbauunternehmen hat eine flexible Reinigungsanlage für die automatisierte Trockenreinigung unterschiedlich geformter Werkstücke entwickelt. Die Reinigung der Werkstücke erfolgt hierbei mechanisch durch rotierende Bürsten in Kombination mit dem Abblasen der Werkstücke unter Einsatz von Stickstoff. Über eine Absauganlage werden die abgetragenen Schmutzpartikel, einschließlich des Stickstoffstroms, abgesaugt und in einer Entstaubungsanlage abgeschieden. Die Reinigungsanlage ist zudem mit adaptierbaren Führungsbürsten und einem Vakuumgreifer ausgestattet. Dieser Aufbau macht den Reinigungsvorgang nahezu unabhängig von der Werkstückform, sodass – mit Ausnahme der Führungsbürsten – eine zeitintensive Umrüstung der Reinigungsanlage entfällt.⁸⁵

Vibrationsreinigung

Die Vibrationsreinigung ist eine weit verbreitete Methode zur Entfernung von Oberflächenverunreinigungen. Sie wird u. a. in der Automobilindustrie, Metallverarbeitung, Elektroindustrie sowie Medizintechnik eingesetzt und zeichnet sich durch eine effiziente und gleichzeitig schonende Oberflächenreinigung aus. Da sie über keine abrasive Reinigungswirkung verfügt, ist die Vibrationsreinigung demnach besonders für empfindliche Materialien bzw. Komponenten mit feinstrukturierten Oberflächen geeignet⁸⁶.

Das Reinigungsprinzip der Vibrationsreinigung basiert auf der Erzeugung von Vibrationen, welche die vorhandenen Verunreinigungen von der Bauteiloberfläche lösen. Hierzu wird die zu reinigende Komponente in eine Reinigungskammer eingespannt, welche zusätzlich von Saugbacken umschlossen ist. In der Reinigungsanlage verbaute Elektromagnete erzeugen die für die Reinigung benötigten Schwingungen, welche von Federblöcken entsprechend abgedämpft werden. Dieser Aufbau ermöglicht die

⁸⁵ Vgl. Sonnenberg, V. (2021).

⁸⁶ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

Erzeugung sinusförmiger Schwingungen, in deren Folge die Adhäsion zwischen Verunreinigung und Bauteiloberfläche aufgehoben wird. Über die Saugbacken werden die losgelösten Verunreinigungen zuletzt abgesaugt. Die Vibrationsreinigung kann je nach Bedarf trocken oder unter Zugabe eines flüssigen Reinigungsmediums in die Reinigungskammer erfolgen⁸⁷.

Die Vibrationsreinigung zeichnet sich gegenüber anderen Reinigungsverfahren durch eine hohe Umweltverträglichkeit aus, gleichzeitig besteht durch die Rückgewinnung der abgereinigten Betriebsmittel (z. B. Kühlschmierstoffe) ein geringes Abfallaufkommen. Ferner lässt sich mithilfe der Vibrationsreinigung sowohl eine kurze Reinigungsdauer (ca. 10 Sekunden) als auch ein hoher Wirkungsgrad (95 – 98 % bei Vorliegen einer flüssigen Verunreinigung) erzielen⁸⁸.

3.4 Thermische Reinigung

Bei der thermischen Reinigung werden die Oberflächenverunreinigungen temperaturbeständiger Bauteile/Komponenten unter Einsatz hoher Temperaturen durch Verdampfung bzw. Oxidation entfernt⁸⁹. Nachfolgend sollen die zwei prominentesten Verfahren der thermischen Reinigung vorgestellt werden:

Wirbelbetteinigung

Bei der thermischen Reinigung im Wirbelbett wird das Reinigungsmedium (z. B. Quarzsand) in einem Reaktor durch das Einblasen eines Gas-/Luft-Gemisches aufgewirbelt und gleichzeitig auf eine Temperatur von 300 – 450 °C aufgeheizt. Durch die vorliegende turbulente Strömung wird die Feststoffschüttung in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt, so dass eine gleichmäßige Partikelverteilung eintritt. Sobald die Zieltemperatur erreicht ist, werden die zu reinigenden Bauteile entsprechend in der

⁸⁷ Vgl. Krebs, M. und Oeken, N. (2011), S. 5 f.

⁸⁸ Vgl. Santner, C. (2010), S. 66.

⁸⁹ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

Wirbelschicht positioniert. Während der Reinigungsbehandlung tritt eine Vergasung bzw. eine Zersetzung der organischen Verunreinigungen ein, etwaige Beschichtungsrückstände (Bindemittel etc.) werden parallel durch die mechanische Reinigungswirkung der im Wirbelbett vorhandenen Partikel abgereinigt^{90 91}.

Die thermische Reinigung im Wirbelbett zeichnet sich vor allem durch ihre Schnelligkeit (< 1 h)⁹² und die effiziente Reinigung geometrisch komplexer bzw. schwer zugänglicher Bauteile aus⁹³. Nachteile liegen jedoch aufgrund des partikulären Reinigungsmediums vor, dessen Handhabung mit hohen Staubemissionen verbunden ist. Ebenso besteht für das zu reinigende Bauteil durch die plötzliche Wärmeeinwirkung im Wirbelbett die Gefahr eines thermischen Schocks, welcher zu mechanischen Spannungen und damit zu einer Schädigung des Bauteils führen kann⁹⁴.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Wirbelbetteinigung nur im Zusammenhang mit abrasionsunempfindlichen Oberflächen eingesetzt werden darf. Außerdem sollten ausschließlich Bauteile gereinigt werden, deren Geometrie die Fluidisierung des Reinigungsmediums nicht behindert (z. B. Verzicht auf Schalen, Kastenformen). Im Rahmen des Reinigungsprozesses entstehen außerdem Schwelgase, die ordnungsgemäß nachverbrannt werden müssen. Das während der Nachverbrennung entstandene Abgas bedarf wiederum einer entsprechenden Filterung⁹⁵.

Pyrolyse

Das Reinigungsprinzip der Pyrolyse basiert auf der thermischen Zersetzung von organischen Verunreinigungen wie Lack-, Farb- oder Klebstoff-

⁹⁰ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

⁹¹ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁹² Vgl. Arena Comet NV (2024).

⁹³ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁹⁴ Vgl. Deixelberger, P.; Steiner, J.; Schabbauer, K.; Koglgruber, F.; Wrulich, H. und Fresner, J. (2010), S. 11.

⁹⁵ Vgl. mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024).

resten unter Sauerstoffabschluss. Hierfür wird das zu reinigende und thermisch stabile Bauteil in einem Pyrolyseofen/einer Pyrolysekammer unter kontrollierten Bedingungen auf die entsprechende Zieltemperatur (390 – 450 °C) erhitzt und die Zieltemperatur anschließend für ca. zwölf Stunden gehalten⁹⁶. Während der thermischen Behandlung kommt es zu einer Verdampfung flüchtiger organischer Verbindungen, während die thermisch stabileren Verunreinigungen als Asche oder Rußrückstand im Ofen verbleiben⁹⁷.

Reinigung von Bremssätteln via Pyrolyse

Ein führendes Herstellungsunternehmen von Bremssystemen führt am tschechischen Standort Liberec das Remanufacturing von Bremssätteln zur Ersatzteilgewinnung für ältere Nutzfahrzeuge durch. Nach der Anlieferung werden die gebrauchten Bremssättel begutachtet und Verschleißteile demontiert. Anschließend durchlaufen die gebrauchten Bremssättel eine zweistufige Reinigung. Im ersten Reinigungsschritt wird der Bremssattel von äußeren Verunreinigungen wie Öl/Fett, Lack und Dichtmittel befreit. Hierfür wird der zu reinigende Bremssattel in einem Pyrolyse-Ofen auf 400 °C erhitzt. Im zweiten Reinigungsschritt wird der Bremssattel in einer Hängebaumstrahlanlage mit Edelpulver abgestrahlt, um die auf der Oberfläche verbliebenen festen Verunreinigungen zu entfernen. Nach einer weiteren Prüfung erfolgt anschließend die Remontage und je nach Auftragslage der direkte Einbau in das Fahrzeug⁹⁸.

Die Pyrolyse wird hauptsächlich zur Entlackung metallischer Komponenten eingesetzt. Pyrolyseanlagen weisen zwar hohe Anschaffungskosten und einen hohen Wartungsaufwand auf, ermöglichen aber aufgrund des

⁹⁶ Vgl. Indusclean NV (2016).

⁹⁷ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

⁹⁸ Vgl. Knorr-Bremse AG (23. April 2020).

geringen Abfallaufkommens eine recht umweltfreundliche Reinigung⁹⁹. Ferner bietet die Pyrolyse durch die exakte Steuerbarkeit der Prozessparameter eine effektive und gleichzeitig materialschonende Reinigung temperaturbeständiger Bauteile¹⁰⁰.

3.5 Manuelle Reinigung

Die manuelle Reinigung zeichnet sich vor allem durch ihre Diskontinuität aus, da sie bevorzugt bei kleinen Werkstücken mit geringer Stückzahl bzw. bei konkretem Reinigungsbedarf angewendet wird. Die Reinigung erfolgt außerdem bei vergleichsweise niedriger Temperatur, sodass die Anforderungen hinsichtlich der technischen Sauberkeit vor allem bei öligen Oberflächen nur bedingt erfüllt werden können. Für die manuelle Reinigung werden in der Regel mobile Reinigungsvorrichtungen/Gefäße (z. B. Pumpsprühflaschen, Spraydosen, Spritzpistolen, Kannen, Eimer, Pinsel, Lappen, Spachtel, Drahtbürsten) eingesetzt. Als Reinigungsmedien kommen u. a. wässrige neutrale Reinigungslösungen (vgl. Kapitel 2.4) sowie diverse Lösungsmittel wie Isopropanol oder Aceton¹⁰¹ zum Einsatz¹⁰².

Trotz besagter Einschränkungen im Hinblick auf die technische Sauberkeit, besitzt die manuelle Reinigung aus Sicht der Ressourceneffizienz auch Vorteile. So beschränkt sich die manuelle Reinigung im Vergleich zu einer vollständigen Bauteilreinigung (z. B. Tauchreinigung, vgl. Kapitel 3.1) lediglich auf die verunreinigten Bereiche von Bauteiloberflächen. Durch diese gezielte Reinigung lässt sich z. B. bei kleinen ölfreien Chargenmengen der Wasser- bzw. Reinigungsmittelverbrauch entsprechend reduzieren. Zudem sind manuelle Reinigungsprozesse meist flexibler, da sie an die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten vor Ort angepasst

⁹⁹ Vgl. Deixelberger, P.; Steiner, J.; Schabbauer, K.; Koglgruber, F.; Wrulich, H. und Fresner, J. (2010), S. 11.

¹⁰⁰ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

¹⁰¹ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 4.

¹⁰² Vgl. Schwarz, W. und Leisewitz, A. (1999), S. 29, 37, 40, 74, 91.

werden können. In Einzelfällen kann die manuelle Reinigung daher auch aus energetischer Sicht sinnvoll sein.

3.6 Sonderreinigungsverfahren

Sonderreinigungsverfahren unterscheiden sich von den Standardreinigungsverfahren insofern, dass sie bspw. nur für kleine Chargenmengen geeignet oder aufgrund ihres Ressourcenverbrauchs (elektrische Energie etc.) sehr kostenintensiv sind. Ebenso können besagte Reinigungsanlagen so stark spezialisiert sein, dass sie lediglich für individuelle Anwendungsbereiche einsetzbar sind. Nachfolgend wird eine Auswahl dieser Sonderreinigungsverfahren vorgestellt.

Laserstrahlreinigung

Die Laserstrahlreinigung ermöglicht eine präzise sowie selektive Reinigung von Oberflächen bei gleichzeitig hoher Reinigungsrate. Aufgrund der kurzen thermischen Einwirkung des gepulsten Laserstrahls handelt es sich außerdem um ein äußerst materialschonendes Reinigungsverfahren. Gegenüber nasschemischen Reinigungsverfahren ist der Energiebedarf der Laserstrahlreinigung dabei vergleichsweise niedrig. Gleichzeitig ist diese Technik nahezu wartungsfrei, sodass generell niedrigere Betriebskosten anfallen. Ferner lassen sich Laserreinigungssysteme platzsparend in bereits vorhandene Anlagen integrieren. Je nach Spezifikation der Reinigungsanlage ist daher gegenüber einem nasschemischen Reinigungssystem mit geringeren Anschaffungskosten zu rechnen. Die Laserstrahlreinigung benötigt zudem weder Strahl-/Lösungsmittel noch Reinigungsmikalien, sodass Reststoffe lediglich in Form des durch den Laserstrahl abgetragenen Materials anfallen¹⁰³.

Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der Laserstrahlreinigung ist eine geometrisch zugängliche Oberfläche. Durch den kombinierten Einsatz von Laser- und Crossjet-Vorrichtungen (gerichteter Luftstrom zwecks

¹⁰³ Vgl. Büchter, E. (2012).

Partikelabtrag) lassen sich ebenfalls hartnäckige Verschmutzungen zuverlässig entfernen. Anwendungsbereiche für die Laserstrahlreinigung sind u. a. die Entfernung von Öl-, Lack- und Farbbreständen von (metallischen) Oberflächen sowie die Oberflächenvorbereitung zur Herstellung von Schweißnähten/Aufbringung einer Lackschicht durch die Entfernung von Oxidschichten¹⁰⁴. Für die Anwendung der Laserstrahlreinigung besteht derzeit hohes Potenzial in der Halbleiterindustrie zur Entfernung von Partikelverunreinigungen im Mikro- und Nanobereich¹⁰⁵.

Plasmareinigung

Die Plasmareinigung ist eine Kombination aus chemischer und physikalischer Reinigung. Die chemische Reaktion stellt in der Regel einen Ätzvorgang durch ionengestützte Sputterprozesse, UV-Licht oder die Einwirkung von Radikalen auf die Bauteiloberfläche bzw. Verschmutzung dar¹⁰⁶. Hierfür werden Prozessgase wie Sauerstoff oder fluorhaltige Gase in die Reinigungskammer eingeleitet und mithilfe eines Hochfrequenzgenerators angeregt, sodass Radikale bzw. ionisierte Teilchen entstehen. Treffen diese auf eine Verunreinigung, findet eine Umsetzung zu Wasser und CO₂ statt (chemische Plasmareinigung). Werden die Prozessgase hingegen in einem Hochfrequenzfeld beschleunigt, tritt eine physikalische Reinigung ein, die sich als eine Art „Mikro-Sandstrahlen“ der Bauteiloberfläche äußert¹⁰⁷. Die Abbauprodukte bzw. das ablatierte Material werden anschließend aus der Reinigungskammer abgepumpt¹⁰⁸.

Die atmosphärische Plasmareinigung gilt zurzeit als eine Feinreinigungstechnik, die zur Abreinigung grober Verunreinigungen eher ungeeignet ist. Jedoch existieren Ansätze, über Pulsen nicht nur die Leistungsdichte,

¹⁰⁴ Vgl. Büchter, E. (2012), S. 37 f.

¹⁰⁵ Vgl. Zhou, Z.; Sun, W.; Wu, J.; Chen, H.; Zhang, F. und Wang, S. (2023), S. 9, 11.

¹⁰⁶ Vgl. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung und Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (2008), S. 5.

¹⁰⁷ Vgl. plasma technology GmbH (2024).

¹⁰⁸ Vgl. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung und Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (2008), S. 5.

sondern auch die Abtragsrate zu erhöhen¹⁰⁹. Die Plasmareinigung erlaubt eine äußerst schonende Reinigung und ist damit vor allem für empfindliche Materialien geeignet. Darüber hinaus handelt es sich um ein vergleichsweise umweltfreundliches Reinigungsverfahren, da weder Lösungsmittel noch hohe Prozesstemperaturen ($T = 20 - 30 \text{ °C}$) erforderlich sind¹¹⁰. Jedoch können je nach Art der Plasmatechnologie hohe Betriebskosten, insbesondere hinsichtlich des Energieverbrauchs, anfallen.

Nach erfolgter Einführung in KMU-relevante Reinigungsverfahren soll im nächsten Abschnitt näher auf die Ressourceneffizienzpotenziale industrieller Reinigungsprozesse eingegangen werden. Unternehmen sollen hierbei ermutigt werden, Digitalisierungsmaßnahmen zur Steuerung/Überwachung von Reinigungsprozessen in Erwägung zu ziehen bzw. die Ressourceneffizienz industrieller Reinigungsprozesse über den gesamten Produktionsprozess zu betrachten.

¹⁰⁹ Vgl. Nettesheim, S. (2017), S. 1960.

¹¹⁰ Vgl. Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024).

4 RESSOURCENEFFIZIENZPOTENZIALE INDUSTRIELLER REINIGUNGSPROZESSE

Die Wahl des passenden Reinigungsverfahrens ist nur eine Möglichkeit, die Ressourceneffizienz industrieller Reinigungsprozesse zu erhöhen. So bieten z. B. Industrie-4.0-Maßnahmen in Form einer Online-Prozessüberwachung oder auch die Erweiterung des Qualitätsmanagements neue Wege für das produzierende Gewerbe, Ressourceneffizienzpotenziale innerhalb industrieller Reinigungsprozesse zu erschließen. Ferner birgt die optimale Reinigung wasserführender Anlagen und -komponenten weiteres Potenzial, die Ressourceneffizienz von Produktionsprozessen zu verbessern.

4.1 Ressourceneffizienzpotenziale der industriellen Bauteilreinigung

Die industrielle Bauteilreinigung verfügt über ein maßgebliches Potenzial zur Ressourceneffizienzsteigerung von Produktionsprozessen. Sowohl Digitalisierungsmaßnahmen als auch eine verbesserte Prozessüberwachung sowie das Retrofitting von Bestandsanlagen bieten auch für KMU geeignete Optionen, die Ressourceneffizienz ihres Unternehmens zu erhöhen.

4.1.1 Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0

Industrie-4.0-Maßnahmen haben in den letzten Jahren eine Revolution hinsichtlich der Digitalisierung von Produktionsprozessen z. B. in Form weitreichender Prozessautomatisierungen ausgelöst. Technologien wie das Internet of Things, künstliche Intelligenz oder auch maschinelles Lernen bieten demnach erhebliches Potenzial zur Ressourceneffizienzsteigerung industrieller Reinigungsprozesse.

Ressourceneffizienz durch Automatisierung

Die Automatisierung von Reinigungsprozessen kann maßgeblich dazu beitragen, die Effizienz der industriellen Bauteilreinigung in Bezug auf

Ressourceneinsatz, Schnelligkeit und Bauteilsauberkeit zu verbessern. So lässt sich der Reinigungsmedieneinsatz bei automatisierten Reinigungssystemen u. a. bedarfsgerecht dosieren, sodass langfristig mit einer Verringerung des Reinigungsmitelesinsatzes und folglich mit einer Reduzierung der Betriebskosten zu rechnen ist. Ferner bietet die Automatisierung von Reinigungsprozessen Vorteile für das Reinigungspersonal, da dieses sowohl körperlich als auch zeitlich entlastet wird.

Die Einführung automatisierter Reinigungsprozesse erhöht somit die Arbeitssicherheit und trägt durch die Optimierung des Personaleinsatzes aus unternehmerischer Sicht zu einer weiteren Verringerung der Betriebskosten bei. Neben den geringeren Wartungskosten einer automatisierten Reinigungsanlage ist zudem ein Anstieg der Produktqualität zu erwarten, da durch die Verringerung menschlicher Eingriffe in den Reinigungsprozess sowohl mit einer geringeren Fehlerwahrscheinlichkeit als auch mit weniger Schwankungen hinsichtlich der Reinigungsleistung zu rechnen ist¹¹¹. Insbesondere beim Teilehandling kann z. B. der Einsatz von Industrierobotern in Kombination mit automatisierten Förder- und Transportsystemen sinnvoll sein, wenn große Stückzahlen im Batch gereinigt werden¹¹².

Automatisierte Trockeneisreinigung von Kernkästen

Für seine Gusssparte hat ein deutscher Technologiekonzern eine Trockeneisreinigungsanlage zur Reinigung von Kernkästen installiert. Die Anlage besteht aus einer CO₂-Station zur Trockeneisbereitstellung, einer Schallschutzkabine zur Lärmeindämmung und einem Roboter, welcher die Strahlanze führt. Die Reinigungsanlage ist in der Lage, bis zu zwölf verschiedene Kernkastentypen zu reinigen. Die Werkstückerkennung erfolgt über RFID-Tags. Die Reinigungsprogramme sind auf die Geometrie der zu reinigenden Komponente abgestimmt und werden au-

¹¹¹ Vgl. Keding Rechenzentrum Reinigung & IT-Sanierung (2024).

¹¹² Vgl. Schulz, D. und Itasse, S. (2020).

tomatisch angewählt. Die Programmierung der Reinigungsprogramme erfolgt offline, sodass die Anlagenauslastung jederzeit gegeben ist. Zum Schutz der Mitarbeitenden wird das während der Reinigung freigesetzte CO₂ durch Bodenkanäle abgesaugt und der CO₂-Gehalt der Raumluft kontinuierlich überwacht. Die automatisierte Trockeneisreinigung bietet im Vergleich zur manuellen Reinigung insofern Vorteile, da sie nicht nur den Zeit- und Kostenaufwand des Reinigungsprozesses reduziert, sondern auch die Arbeitssicherheit erhöht. Gleichzeitig liefert die automatisierte Reinigung eine hohe Reproduzierbarkeit bei gleichbleibender Qualität des Reinigungsergebnisses¹¹³.

Prozessoptimierung durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI)

Der Einsatz künstlicher Intelligenz kann durch die Sammlung und Analyse von Prozessdaten dazu beitragen, den Ressourcenverbrauch industrieller Reinigungsprozesse langfristig zu optimieren¹¹⁴. Ferner bietet der KI-Einsatz die Möglichkeit, Reinigungspläne zu optimieren, sodass die für die industrielle Bauteilreinigung erforderlichen Arbeitsabläufe effizienter durchgeführt werden können¹¹⁵.

Die Anwendung von Machine-Learning-Algorithmen hilft wiederum, Muster abzuleiten bzw. Reinigungsroutrinen zu entwickeln und bestehende Reinigungsprozesse auf diese Weise weiter zu optimieren¹¹⁶. Der Einsatz von Machine Learning kann außerdem weniger erfahrene Mitarbeitende bei der Entscheidungsfindung bezüglich der optimalen Reinigungsparameter unterstützen. Im Rahmen eines Assistenzsystems kann Machine Learning daher nicht nur dazu beitragen, den Ressourcenverbrauch der

¹¹³ Vgl. Meissner AG (2024).

¹¹⁴ Vgl. Keding Rechenzentrum Reinigung & IT-Sanierung (2024).

¹¹⁵ Vgl. Isler, K. (2024).

¹¹⁶ Vgl. Schlauchservice Baumann GmbH (2024).

industriellen Reinigung zu verringern, sondern auch durch ungeeignete Reinigungsprozesse hervorgerufene Materialschäden aktiv zu verhindern¹¹⁷.

Einsatz digitaler Zwillinge zur Optimierung von Reinigungsprozessen

Ein digitaler Zwilling dient als digitales Abbild einer Reinigungsanlage und kann so u. a. zur Simulation von Prozessabläufen oder Darstellung von Planungsprozessen eingesetzt werden¹¹⁸. Die Durchführung von Simulationen erlaubt wiederum eine Testung des Reinigungssystems vor seiner technischen Umsetzung, sodass bereits in der Konzeptionierungsphase hinreichende Optimierungen vorgenommen werden können. Dies spart seitens des Anlagenbetreibenden wertvolle Kosten ein, da zeitintensive Tests im laufenden Betrieb entfallen. So kann z. B. das Strömungsverhalten mittels CFD-Simulationen¹¹⁹ untersucht werden, um frühzeitig mögliche Schwachstellen innerhalb des Reinigungssystems zu identifizieren.

Digitaler Zwilling zur Echtzeitmodellierung der Aufbereitung von Produktionsabwässern aus der Behälterreinigung

Für die optimale Behandlung ihrer Produktionsabwässer hat eine deutsche Herstellerfirma von Körperpflegeprodukten einen digitalen Zwilling entwickelt, welcher die chemisch-physikalischen Prozesse der betriebseigenen Abwasserreinigungsanlage in Echtzeit modelliert. Die für die Modellierung erforderlichen Informationen bezüglich des Reinigungsvorgangs und der Art des Produktionsrückstands werden durch den Barcodescan des entsprechenden Produktionsbehälters bereitgestellt. In Kombination mit den Daten zur Abwassermenge und den Ergebnissen der entsprechenden Inline-Messungen zu Redoxpotential, Leitfähigkeit, Trübung und pH-Wert ermittelt der digitale Zwilling eine

¹¹⁷ Vgl. Shrestha, G. M. und Niggemann, O. (2014), S. 3 f., 6.

¹¹⁸ Vgl. Lehmann, S. und Di Figlia, M. (2021).

¹¹⁹ Vgl. Schöler, M.; Fuchs, T.; Helbig, M.; Augustin, W.; Scholl, S. und Majschak, J.-P. (2009), S. 456.

Abwasserbehandlung, die hinsichtlich des Chemikalieneinsatzes und der Behandlungszeit individuell an die jeweilige Abwasserzusammensetzung angepasst ist. Auf diese Weise wird bei gleichbleibend hoher Qualität des aufgereinigten Abwassers eine möglichst nachhaltige Reinigung gewährleistet. Die Empfehlungen des digitalen Zwillings werden zusätzlich durch das Bedienpersonal bewertet und bei Bedarf angepasst, sodass das Reinigungssystem einer kontinuierlichen Verbesserung unterliegt¹²⁰.

Internet of Things (IoT) zur Online-Überwachung/Steuerung von Reinigungsprozessen

Die Vernetzung von Produktions-/Reinigungsanlagen im Rahmen eines IoT eröffnet Potenziale zur Effizienzsteigerung und Optimierung von Produktionsabläufen¹²¹. Der Einsatz vernetzter Sensoren erlaubt eine präzisere Steuerung bzw. Überwachung von industriellen Reinigungsprozessen, sodass bspw. Reinigungsmedien wie Spülwasser optimal eingesetzt werden können¹²². Neben der permanenten Erfassung der Prozessparameter (Temperatur, Druck etc.) bietet auch die Dokumentation der Anlagenparameter (z. B. Stromverbrauch, Betriebsstunden) weiteres Potenzial zur Ressourceneinsparung¹²³. Die Integration von Datenanalysen und Predictive Maintenance in Reinigungsprozesse trägt ebenfalls dazu bei, Ausfallzeiten bzw. Reparaturkosten im Rahmen einer proaktiven Wartung zu minimieren sowie den Energieverbrauch von Reinigungsanlagen langfristig zu verringern. Ferner besteht die Option, den Verschmutzungsgrad bzw. die Reinigerkonzentration von Reinigungsbädern durch moderne Inline-Verfahren (z. B. Einsatz von Ultraschallsensoren zur Konzentrationsbestimmung von Reinigern/Verunreinigungen über die Messung von

¹²⁰ Vgl. Bitter, E. (2021).

¹²¹ Vgl. Tennant GmbH & Co. KG (2024).

¹²² Vgl. Isler, K. (2024).

¹²³ Vgl. Schulz, D. und Itasse, S. (2020).

Schallgeschwindigkeitsveränderungen im Reinigungsmedium) in Echtzeit zu erfassen, um z. B. die Reinigerdosierung zu überwachen oder auch unnötige Badwechsel zu vermeiden. Auf diese Weise lässt sich nicht nur der Ressourceneinsatz der Reinigung bezogen auf Spülwasser, Reinigungsmittel und Energie optimieren, sondern ebenso eine gleichbleibende Qualität des Reinigungsergebnisses gewährleisten.

Automatisierte Reinigung von Getriebegehäusen

Ein deutscher Hersteller für Getriebemotoren hat in einem chinesischen Werk eine Reinigungsanlage für die vollautomatische Reinigung von Getriebegehäusen installiert. Die Reinigungsanlage verfügt über ein Vierkammersystem und ist mit einem Shuttle-Transportsystem ausgestattet, sodass stündliche Durchsatzraten von bis zu 14 Chargen erreicht werden. Des Weiteren verfügt die Anlage über einstellbare Niederhalter, welche die Reinigung unterschiedlich großer Getriebegehäuse ($\Delta H \leq 80 \text{ mm}$) auf der gleichen Anlage ermöglichen. Die Reinigung der Gehäuse erfolgt in drei Stufen (Vorreinigung, Passivierung, Trocknung), welche wiederum auf zwei Kammern verteilt sind. Durch die Anlagenauslegung als Vierkammersystem und die kontinuierliche Bestückung der Niederhalter können die Reinigungsprozesse parallel durchgeführt werden, sodass kurze Taktzeiten erreicht werden. Ferner verfügt die Reinigungsanlage über diverse Datenschnittstellen, welche eine Echtzeitauswertung der Prozessdaten (z. B. Verschmutzungsgrad Beutelfilter/Reinigungsflüssigkeit) und damit sowohl eine Prozesssteuerung als auch Fernwartung der Reinigungsanlage ermöglichen. Durch die Erhebung von Fehlerdiagnosen und eine schnelle Reaktion auf Veränderungen hinsichtlich der Reinigungsparameter kann so jederzeit eine gleichbleibende Bauteilsauberkeit sichergestellt werden¹²⁴.

¹²⁴ Vgl. BVL Oberflächentechnik GmbH (2023).

Online-Überwachung von Reinigungsbädern

Ein deutscher Technologiekonzern hat im Geschäftsbereich „Automotive Electronics“ an den Produktionsstandorten Reutlingen und Hatvan (Ungarn) ein Messsystem zur Online-Überwachung der wässrigen Reinigung von elektronischen High-End-Schaltmodulen für elektrische Servolenkungen installiert. Der Produktionsprozess erfolgt unter Reinraumbedingungen und verfügt über mehrere Reinigungsstufen (Ultraschall-/ sowie Sprühreinigungsbäder). Diese sind mit entsprechender Sensorik ausgestattet, die in der Lage ist, die Reinigerkonzentration inline zu bestimmen und anhand des Messergebnisses die Dosierung des wässrigen Reinigers anzupassen. Die Konzentrationsbestimmung des Reinigers/der Verunreinigung basiert auf der Messung der absoluten Schallgeschwindigkeit. In Kombination mit einer Temperaturmessung, lässt sich hieraus anschließend die Konzentration der jeweiligen Spezies berechnen. Die Messstellen sind so gewählt, dass sie zum einen als Ansatzkontrolle am Mischbehälter, zum anderen als kontinuierliche Badpflege fungieren. So dienen vor allem die nachgelagerten Messstellen dazu, Verschleppungen des Reinigers in die Spülbäder bzw. Wasserverluste durch Verdunstung frühzeitig zu erkennen und der Reinigungslösung bei Bedarf Frischwasser zuzuführen. Die gesammelten Messdaten werden anschließend im Controller hinterlegt und an die SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) übertragen, sodass automatisch Reinigungsmittel nachdosiert oder ein Badwechsel rechtzeitig signalisiert wird. Ferner können die gesammelten Prozessdaten zu Analyse-/Dokumentationszwecken über einen PC oder das Prozessleitsystem online ausgelesen und zur weiteren Prozessoptimierung eingesetzt werden. Das Unternehmen profitiert durch die Online-Überwachung der Reinigungsbäder sowohl von der Sicherstellung der Reinigungsqualität als auch von der Optimierung des Ressourceneinsatzes.¹²⁵

¹²⁵ Vgl. SensoTech GmbH (2015), S. 46 – 48.

4.1.2 Ressourceneffizienz durch Überwachung der technischen Sauberkeit

Die Sauberkeitsüberwachung stellt für produzierende Unternehmen ein wichtiges Werkzeug zur Kontrolle des Reinigungsergebnisses und damit zur Sicherstellung der Produktqualität dar. So lassen sich durch die frühzeitige Erkennung von Defiziten im Bereich der technischen Sauberkeit Fehlchargen bzw. eine Wiederholung von Reinigungsprozessen vermeiden und damit Ressourcen einsparen. Die etablierten Methoden zur Sauberkeitsüberwachung werden in direkte, indirekte und analytische Methoden differenziert. Für produzierende Unternehmen ist bei der Methodenauswahl generell zu beachten, dass die angestrebte Technologie zur Sauberkeitsüberwachung zerstörungsfrei sowie leicht anwendbar sein sollte¹²⁶.

Direkte Methoden zur Sauberkeitsüberwachung

Direkte Methoden zur Sauberkeitsüberwachung setzen unmittelbar an der verunreinigten Oberfläche an. So wird eine Oberflächeneigenschaft gemessen, die einen eindeutigen Bezug zum Grad der Verunreinigung des verschmutzten Bauteils aufweist. Eine nähere Bestimmung der Verunreinigungszusammensetzung findet nicht statt. Direkte Methoden zur Sauberkeitsüberwachung sind insofern von Vorteil, da die Oberflächenmessung im Vergleich zu den erfahrungsgemäß günstigeren indirekten Methoden eine eindeutigere Aussage zum Verschmutzungsgrad des zu reinigenden Bauteils liefert. Zu den direkten Methoden der Sauberkeitsüberwachung werden z. B. die erweiterte Sichtprüfung, der Einsatz von Schwarzlicht zur Partikelvisualisierung, der Wasserbruchttest (Nachweis von Fett- bzw. Ölrückständen), die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts (TOC) zum Nachweis organischer Verunreinigungen oder auch die Kontaktwinkelmessung¹²⁷ bzw. die Messung der optisch stimulierten Elek-

¹²⁶ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 413.

¹²⁷ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 414 f.

tronenemission (OSEE)¹²⁸ zum Nachweis filmischer Verunreinigungen gezählt.

Als eine der meistangewandten direkten Methoden der Sauberkeitsüberwachung soll an dieser Stelle die erweiterte Sichtprüfung näher erläutert werden. Die visuelle Untersuchung der Verunreinigungen erfolgt unter Vergrößerung durch eine in der Auflichtmikroskopie äußerst erfahrene Person. Abhängig von der vorliegenden Verunreinigung kann bei der mikroskopischen Untersuchung der Einsatz von langwelligem UV- oder polarisiertem Licht sinnvoll sein¹²⁹. Die Entnahme des für die Untersuchung notwendigen Probenmaterials erfolgt in der Regel durch die sogenannte Tape-Lift-Methode direkt von der Bauteiloberfläche oder mithilfe spezieller Partikelfallen¹³⁰.

Indirekte Methoden zur Sauberkeitsüberwachung

Indirekte Methoden zur Sauberkeitsüberwachung setzen nicht an der zu reinigenden Oberfläche an, sie orientieren sich stattdessen am Verunreinigungsgrad der eingesetzten Spülflüssigkeit. Der Vorteil indirekter Methoden zur Sauberkeitsüberwachung liegt in der schnellen Bereitstellung der Messergebnisse sowie kostengünstigen Umsetzbarkeit. Die Genauigkeit der Messergebnisse ist jedoch abhängig von der Fähigkeit der Spülflüssigkeit, die vorhandenen Verunreinigungen vollständig aufzunehmen. So können Fehlinterpretationen auftreten, wenn bspw. die Menge der Spülflüssigkeit nicht ausreicht, um die vorhandenen Verunreinigungen in Gänze zu entfernen. Für die indirekte Sauberkeitsüberwachung werden z. B. optische Messmethoden wie die UV-Spektroskopie, aber auch Partikelzähler eingesetzt¹³¹.

¹²⁸ Vgl. Windisch, M. (2019), S. 103.

¹²⁹ Vgl. Jones, L. K. (1965), S. 9.

¹³⁰ Vgl. Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014), S. 3.

¹³¹ Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 414.

Analytische Methoden zur Sauberkeitsüberwachung

Analytische Methoden zur Sauberkeitsüberwachung werden genutzt, um zusätzlich zum Nachweis einer Kontamination deren Art bzw. Menge zu bestimmen. Die Untersuchung der Verunreinigung kann entweder direkt auf der Bauteiloberfläche oder indirekt z. B. über das Spülwasser erfolgen. Der Einsatz analytischer Methoden zur Sauberkeitsüberwachung ist jedoch im Vergleich zu den gängigen direkten Methoden ohne Quantifizierung/Verunreinigungsbestimmung zumeist kostenintensiver.

Die Anwendung analytischer Methoden zur Sauberkeitsüberwachung, aber auch die Interpretation der generierten Messergebnisse benötigen außerdem ein hohes Maß an Fachwissen. Jedoch kann ihr Einsatz trotz des Mehraufwands sinnvoll sein, da analytische Methoden zur Sauberkeitsüberwachung wertvolle Informationen zur Quelle einer Oberflächenkontamination liefern und damit effektiv zur Minimierung des Verschmutzungsgrades beitragen können. Geeignete analytische Methoden zur Sauberkeitsüberwachung sind z. B. die stationäre/dynamische Sekundärionen-Massenspektroskopie (SEM), die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), die energie- und wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie (EDX; WDX) oder auch die Augerelektronenspektroskopie (AES)¹³².

Weiterführende Maßnahmen zur Sicherstellung der technischen Sauberkeit

Neben der eigentlichen Prozessüberwachung können produzierende Unternehmen auch im Nachgang des Reinigungsprozesses noch Maßnahmen ergreifen, um die technische Sauberkeit der gereinigten Bauteile/-komponenten sicherzustellen. Die Vorbeugung von Rekontaminationen wirkt sich ebenfalls positiv auf die Ressourceneffizienz der Bauteilreinigung aus, da z. B. unnötige Wiederholungen von Reinigungsvorgängen vermieden und damit Ressourcen eingespart werden.

¹³² Vgl. Chawla, M. K. (2001), S. 414.

So kann bspw. eine Messung der Umgebungssauberkeit sinnvoll sein, um das Rückverschmutzungsrisiko ungeschützter Bauteile abzuschätzen und den Ursprung kritischer Partikelverunreinigungen zu bestimmen¹³³. Auf Basis dieses Wissens lassen sich anschließend Maßnahmen ergreifen, um kritische Partikelkontaminationen bereits in ihrer Entstehung zu verhindern. Bei unvermeidbaren Verunreinigungen sind die bereits gereinigten Komponenten entsprechend gegen den Eintrag von Partikeln aus der Umgebung zu schützen.

Daher ist auch im Rahmen von Transport, Lagerung und Warenbereitstellung stets auf die Gefahr einer Rekontamination zu achten¹³⁴. Hier können bspw. geeignete Logistikkonzepte in Form von Schleusen oder auch spezielle Verpackungen Abhilfe schaffen. Ebenso sollten die Mitarbeitenden hinsichtlich des Themas Qualitätsmanagement sensibilisiert werden, um entsprechende Sauberkeitsstandards bzw. Verhaltensweisen frühzeitig in den Arbeitsalltag zu integrieren¹³⁵.

4.1.3 Retrofitting bestehender Reinigungsanlagen

Das Retrofitting bestehender Reinigungsanlagen bietet die Möglichkeit, die Lebensdauer durch einen in der Regel überschaubaren Investitionsaufwand signifikant zu verlängern. Dies spart im Vergleich zum Anlagenneukauf nicht nur Kosten ein, sondern kann ebenso auf die Ressourceneffizienz produzierender Unternehmen einzahlen, wenn ebenfalls Maßnahmen zur Effizienzsteigerung getroffen werden. So eröffnet bspw. die Implementierung moderner Steuerungssysteme erhebliches Potenzial zur Reduzierung des bisherigen Ressourceneinsatzes. Ferner bietet das Retrofitting die Option, Recycling- bzw. Wiederverwendungssysteme in das bestehende Reinigungssystem zu integrieren, um die bisher anfallende

¹³³ Vgl. Krebs, M. und Zwinkau, R. (2014), S. 24.

¹³⁴ Vgl. Gommel, U. und Kreck, G. (2022), S. 7.

¹³⁵ Vgl. Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014), S. 4.

Abfall- bzw. Abwassermenge zu reduzieren und damit die Umwelt zu schonen.

Um eine sichere Datengrundlage für die energetische Optimierung von Reinigungsprozessen zu schaffen, sollten Reinigungsanlagen zunächst mit Energieverbrauchszählern ausgestattet werden. So kann bei Bestandsanlagen ein erster Ansatz zur Energieeinsparung z. B. darin bestehen, auf energieeffizientere Motoren umzurüsten oder eine Anpassung der Pumpleistung durch den Einbau von Frequenzumrichtern vorzunehmen. Ebenso bietet die Optimierung der Vor-/Nachlaufzeit der verbauten Aggregate (z. B. Heißluftgebläse, Vakuumpumpen) weiteres Potenzial zur Energieeinsparung. Ferner kann die richtige Dimensionierung der Nennweite von Rohrinstallationen dazu beitragen, die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und damit die notwendige Pumpleistung zu verringern. Die Isolierung bzw. räumliche Trennung von wärme-/kälteführenden Komponenten bietet zusätzliches Potenzial zur Energieeinsparung und sollte daher ebenfalls geprüft werden. Des Weiteren sind freie Funktionsoberflächen möglichst gering zu halten bzw. abzudichten, wenn Energieverluste durch aufsteigenden Wasserdampf etc. zu erwarten sind. Bei Großanlagen ist außerdem zu prüfen, ob alternative Beheizungssysteme wie Wärmepumpen, Dampferzeuger oder auch ein Blockheizkraftwerk geeignete Optionen zur Energieeinsparung darstellen. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob innerhalb des Reinigungsprozesses evtl. Potenzial zur Energierückgewinnung besteht. So kann bspw. die Installation eines Wärmeübertragers oder Aufbereitungs- und Destillationssystems mit Wärmerückgewinnung helfen, die bisher erforderliche Heiz- bzw. Kühlleistung zu verringern¹³⁶.

Spezielle Softwarelösungen können dazu beitragen, Reinigungsanlagen bei Leerlauf in einen echten Stand-by-Modus zu versetzen, um zusätzlich Energie einzusparen. Im Rahmen des Energiemanagements ist ebenfalls zu prüfen, ob externe Wärme aus Solarthermie oder Produktionsprozessen in den bestehenden Reinigungsprozess eingekoppelt werden kann.

¹³⁶ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2017), S. 3 f.

Ebenso kann es sinnvoll sein, besonders energieintensive Prozessschritte wie die Bauteiltrocknung durch neuere energieeffizientere Verfahren zu ersetzen. So lassen sich bspw. durch den Wechsel von der klassischen Heißlufttrocknung auf eine Kondensationstrocknung mit Wärmepumpe Energieeinsparungen von bis zu 75 % erzielen¹³⁷. Es ist jedoch grundsätzlich zu beachten, dass die energetische Optimierung einer Reinigungsanlage niemals zu Lasten der technischen Sauberkeit erfolgen darf¹³⁸.

4.1.4 Ressourceneffizienz durch optimierte Prozessführung

Neben den anlagenspezifischen Parametern sollte bei der industriellen Bauteilreinigung auch die bisherige Prozessführung auf weiteres Optimierungspotenzial überprüft werden. Die Reinigungsparameter wie Behandlungs-, Spül- und Trockendauer werden in der Regel anhand eines Worst-Case-Szenarios (z. B. stark verschmutztes Bauteil) festgelegt. Liegt der Großteil der zu reinigenden Komponenten lediglich leicht verschmutzt vor, ist die Reinigung in Bezug auf den Ressourcenverbrauch oft zu großzügig ausgelegt.

Die ganzheitliche Betrachtung eines mehrstufigen Reinigungsprozesses unter dem Aspekt der technischen Sauberkeit kann daher helfen, versteckte Ressourceneffizienzpotenziale innerhalb der Prozessführung zu identifizieren. So kann es bspw. sinnvoll sein, im Rahmen der Produktion Zwischenreinigungsstufen wie Abblasen oder Gegenspülen einzuführen, bevor die zu reinigenden Komponenten den eigentlichen Reinigungsprozess durchlaufen. Auf diese Weise bleibt die Nettoverschmutzung auf einem konstanten Niveau, sodass das Auftreten stark verunreinigter Komponenten verhindert wird. Gleichzeitig sinkt der Ressourcenverbrauch, da die niedrigere Schmutzfracht nicht nur eine geringere Behandlungszeit der

¹³⁷ Vgl. Schulz, D. (2022).

¹³⁸ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2017), S. 2.

zu reinigenden Komponenten erfordert, sondern auch den Energieaufwand der Medienaufbereitung reduziert¹³⁹.

4.2 Ressourceneffizienzpotenziale der industriellen Anlagen- und Rohrreinigung

Die regelmäßige Wartung von Produktionsanlagen und der wasserführenden Peripherie kann dazu beitragen, die Produktionseffizienz zu verbessern und den Ressourcenverbrauch von Reinigungsprozessen zu reduzieren. Durch die Implementierung entsprechender Reinigungsmaßnahmen können Unternehmen des produzierenden Gewerbes daher nicht nur Kosten einsparen, sondern auch insgesamt nachhaltiger wirtschaften.

4.2.1 Wärme- und Kühlkreislauf

Zur wasserführenden Peripherie des Wärme- und Kühlkreislaufes von Produktionsanlagen werden u. a. technische Einrichtungen wie Kühltürme oder Wärmeübertrager gezählt. Durch den permanenten Wasserkontakt können auch bei diesen Anlagen Verunreinigungen in Form von Algenwachstum oder mineralischen Ablagerungen auftreten, die zum Erhalt der Funktionsfähigkeit regelmäßig entfernt werden müssen.

Verdunstungskühltürme

Für eine optimale Kühlwirkung muss der Füllkörper eines Verdunstungskühlturms eine saubere Oberfläche aufweisen. So kann eine mangelhafte Wartung, aber auch ein zu großzügig gewähltes Reinigungsintervall in relativ kurzer Zeit zu enormen Leistungseinbußen führen. Oft ist dann eine durch externe Reinigungsfirmen durchgeführte kostenintensive mechanische Reinigung der Anlage mit anschließender Entkalkung erforderlich, um innerhalb der Produktion das Risiko eines Totalausfalls zu verhindern. Bei der Nachspeisung von Frischwasser ist hingegen auf eine entspre-

¹³⁹ Vgl. Schulz, D. (2022).

chende Wasseraufbereitung zu achten, um z. B. der Entstehung kritischer Kalkablagerungen im System vorzubeugen¹⁴⁰.

Der störungsfreie Betrieb von Verdunstungskühltürmen erfordert daher die Einführung einer regelmäßigen Reinigungsroutine sowie eine fachgerechte Kontrolle angebundener Wasseraufbereitungsanlagen. Hierzu gehören z. B. die wöchentliche Entleerung und anschließende Reinigung der Kühlturmwanne sowie die Kontrolle des Saugsiebs. Bei Algenbefall müssen alle Teile des Turms vom vorhandenen Bewuchs befreit werden. Parallel sind entsprechende Wasseraufbereitungsmaßnahmen durchzuführen, um ein erneutes Algenwachstum bereits in der Entstehung zu verhindern und Rohre sowie nachgelagerte Anlagen wie Pumpen, Wärmeübertrager oder Kältemaschinen vor einer Kontamination und den damit verbundenen Leistungseinbußen zu schützen¹⁴¹.

Ebenso sind Kühltürme durch entsprechende Hygienemaßnahmen vor einer Besiedelung durch gesundheitsschädliche Mikroorganismen wie Legionellen zu schützen. So sind in regelmäßigen Abständen mikrobiologische Untersuchungen durchzuführen, um bei einer Grenzwertüberschreitung entsprechende Bekämpfungsmaßnahmen (z. B. Einsatz von Bioziden) einzuleiten und eine Freisetzung von Legionellen in die Umgebungsluft durch den Wasserdampf des Kühlturms frühzeitig zu verhindern¹⁴². So kann dem Kühlwasser bspw. eine Kombination aus Dispergator und Biozid zugegeben werden, um die vorhandenen Biofilmanwachstungen von der Oberfläche der wasserführenden Komponenten zu entfernen¹⁴³.

Wärmeübertrager

Wärmeübertrager sind konstruktionsbedingt anfällig für eingeschwemmte Verunreinigungen (Schlamm-, Sandablagerungen) sowie Verkrus-

¹⁴⁰ Vgl. IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024b).

¹⁴¹ Vgl. Scicchitano, M. A. (2008), S. 4.72.

¹⁴² Vgl. aqua-Technik Beratungs GmbH (2024b).

¹⁴³ Vgl. Henning, K. (2016), S. 79.

tungen in Form von Kalk, welche bereits in geringem Ausmaß zu massiven Leistungseinbußen führen können.

Um die Vorlaufzeittemperatur des Wärmeübertragers auf einem konstanten Niveau zu halten, aber auch Betriebsstörungen zu verhindern, sind die Rohrbündel einer regelmäßigen Reinigung zu unterziehen. Zu diesem Zweck ist eine entsprechende Reinigungsroutine einzuführen, die sowohl die Anwendung von Spülverfahren als auch eine fachgerechte Entkalkung beinhalten sollte¹⁴⁴.

Umweltfreundliche Wasserbehandlung von Kühlsystemen mithilfe funktioneller Mikroorganismen

Ein Start-up-Unternehmen der CleanTech-Branche hat ein neues umweltfreundliches Verfahren für die Kühlwasserbehandlung von Industrieanlagen entwickelt. Die Reinigungswirkung basiert hierbei auf der kontinuierlichen Zugabe funktioneller Mikroorganismen, welche schadhafte Bakterien langfristig aus dem Biofilm des Kühlkreislaufes verdrängen. Die gutartigen Mikroorganismen bilden hierfür eine Netzstruktur aus, welche das bisherige Ökosystem der schädlichen Bakterien so sehr verändert, dass diese in den Bereich des fließenden Wassers abwandern und schließlich fortgespült werden. Durch die Kombination von funktionellen Mikroorganismen und Biopolymeren wird die Effizienz der Kühlwasserbehandlung in puncto Korrosionsschutz und Stabilisierung der Wasserhärte weiter gesteigert. Darüber hinaus hilft der Einsatz von Biopolymeren, den Phosphateintrag in das Kühlwasser signifikant zu reduzieren, sodass Abwassergrenzwerte seltener überschritten werden. Der Zustand des Kühlwassers wird außerdem über ein Online-Monitoring relevanter Systemparameter fernüberwacht, wodurch ein schnelles Eingreifen in das Kühlwassersystem bei Notfällen sichergestellt ist. Die Fernüberwachung ermöglicht zudem die Möglichkeit einer Prozessoptimierung mit gleichzeitiger Predictive Maintenance. Dies reduziert

¹⁴⁴ Vgl. IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024c).

nicht nur langfristig den Wartungsaufwand der Anlage, sondern ist auch für das Personal mit einer signifikanten Zeitersparnis verbunden. Durch das neue Verfahren kann zudem vollständig auf den Einsatz kostenintensiver Biozide verzichtet werden, sodass die Umwelt profitiert und ebenso Betriebskosten eingespart werden¹⁴⁵.

Ebenso kann die Durchführung einer mechanischen Reinigung (z. B. Bürstenreinigung) oder der Einsatz eines HydroDrilling-Systems sinnvoll sein, um bspw. Verunreinigungen in Form von Biofilmen oder Korrosionsrückständen zu entfernen. Auch aus wirtschaftlicher Sicht sollten produzierende Unternehmen auf eine regelmäßige Reinigung von Wärmeübertragern achten, um ebenso hinsichtlich der Prozesswärme eine effiziente und möglichst nachhaltige Produktion sicherzustellen¹⁴⁶.

4.2.2 Erzeugung von Prozessdampf

Prozessdampf stellt in industriellen Produktionsprozessen ein wichtiges Medium für den Wärmetransport von Heiz- und Trocknungsprozessen dar. Wird der Prozessdampf auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt, tragen die im Vergleich zu fossilen Energieträgern erzielten CO₂-Einsparungen zusätzlich zu einer umweltfreundlicheren Produktion bei. Für eine möglichst energieeffiziente Bereitstellung von Prozessdampf ist auch der Wartungszustand des Dampfkessels von elementarer Bedeutung. So sind u. a. die wasserführenden Komponenten einer regelmäßigen Reinigungsroutine zu unterziehen, um auch hinsichtlich der Dampferzeugung einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Beim Betrieb des Dampferzeugers entstehen an den Heizflächen sukzessive Ablagerungen, die nicht nur die Korrosion beschleunigen, sondern ebenso den Wirkungsgrad der Wärmeübertragung herabsetzen. Besagte Ablagerungen lassen sich im laufenden Betrieb jedoch mithilfe

¹⁴⁵ Vgl. Havighorst, L. und Lindemann, E. (2023), S. 34 f.

¹⁴⁶ Vgl. Saxon, G. E. [.] und Putman, R. E. (2003), S. 8.

sogenannter Wasserlanzenbläser entfernen. Die Reinigungsparameter (Wassermenge, Verweilzeit und Auftreffwinkel des Wasserstrahls) werden hierbei auf die Stärke der Ablagerungen abgestimmt. Als Referenz für den Grad der Anwachungen dient die Abgastemperatur des Dampferzeugers. Demnach ist ein Anstieg der Abgastemperatur zu verzeichnen, wenn die Wärmeauskopplung aufgrund vorhandener Oberflächenaufwachungen sinkt¹⁴⁷.

Zur Gewährleistung eines stabilen Betriebs, aber auch für eine möglichst lange Lebensdauer der Anlage ist bei Dampferzeugern vor allem auf die Aufbereitung des Kesselspeisewassers zu achten. Zur Vermeidung von Kalkablagerungen und Korrosionsschäden kann eine technische Kesselwasseraufbereitung in Form einer Enthärtung/Entsalzung bzw. eine chemische Behandlung des Kessel- und Kesselspeisewassers durchgeführt werden¹⁴⁸. Sollten die Kalkausscheidungen bzw. die durch das Dampfnetz eingebrachten Schlämme/Partikel dennoch ein kritisches Niveau erreicht haben, ist der Dampfkessel zu entleeren und die vorhandenen Ablagerungen sind fachgerecht zu entfernen. Für die Entkalkung des Dampfkessels dürfen ausschließlich zugelassene Spezialprodukte verwendet werden¹⁴⁹.

4.2.3 Behälterreinigung

Für die Ressourceneffizienz von Produktionsprozessen kommt der Behälterreinigung eine bedeutende Rolle zu. So tragen saubere Produktions-/Lagerbehälter maßgeblich zur Verhinderung von Kontaminationen bei, welche die Qualität des Endprodukts herabsetzen oder auch zu ganzen Produktionsausschüssen führen können. Eine gut organisierte Behälterreinigung hilft daher nicht nur, das zusätzliche Abfallaufkommen, sondern auch den zur Kompensation des Produktionsausfalls erforderlichen Ressourcenaufwand zu vermeiden. Ferner trägt eine regelmäßige Reinigungsroutine dazu bei, kritische Ablagerungen frühzeitig zu entfernen und der

¹⁴⁷ Vgl. Rostkowski, S. und Beckmann, M. (2014), S. 1.

¹⁴⁸ Vgl. aqua-Technik Beratungs GmbH (2024a).

¹⁴⁹ Vgl. IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024a).

Entstehung von Korrosionsschäden entgegenzuwirken. Dies wirkt sich positiv auf den Wartungsaufwand sowie die Lebensdauer von Behältern aus. Produzierende Unternehmen profitieren durch diese Steigerung der innerbetrieblichen Ressourceneffizienz von einer zusätzlichen Kosteneinsparung.

Um eine Verunreinigungsverschleppung vom Behälter in das Produkt zu verhindern, ist auch im Rahmen der Behälterreinigung eine Sauberkeitsanalyse obligatorisch. Geeignete Verfahren sind bspw. die Nassextraktion durch Spritzen oder die Trocken-Saugextraktion¹⁵⁰ (s. Kapitel 5.1). Vor der eigentlichen Reinigung des Behälters ist zudem zu prüfen, ob vorhandene Produktionsreste eventuell noch verkaufsfähig sind. Auf diese Weise lassen sich unnötige Abfälle vermeiden und Produktionskosten einsparen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sich besagte Produktionsreste unter vertretbarem Aufwand aus dem Behälter zurückgewinnen lassen¹⁵¹.

Die Reinigung industrieller Behälter kann entweder manuell, mechanisch automatisiert oder unter dem Einsatz spezieller Reinigungsroboter erfolgen. Für die Wahl der passenden Reinigungsmethode sind die Faktoren Sicherheit, Leistung, Umwelteinfluss und Kostenaufwand ausschlaggebend. So überzeugen automatisierte Reinigungssysteme bspw. durch ihre Schnelligkeit, während Reinigungsroboter die größte Sicherheit bieten. Ferner verfügen automatisierte Reinigungssysteme in der Regel über geschlossene Reinigungskreisläufe, sodass das Reinigungsmedium im Vergleich zur manuellen Reinigung effizienter eingesetzt werden kann. Sind automatisierte Reinigungssysteme darüber hinaus mit entsprechenden Trennsystemen ausgestattet, können Stoffströme gezielt zurückgewonnen und Abfälle vermieden werden. Die manuelle Reinigung stellt zumeist die kostengünstigste Option dar. Aus Sicht des Reinigungspersonals ist diese Art der Reinigung jedoch mit einem hohen Sicherheitsaufwand verbunden, insbesondere wenn es sich um geschlossene Behälter bzw.

¹⁵⁰ Vgl. Zwinkau, R. et al. (2021), S. 4.

¹⁵¹ Vgl. Goode, K. R. et al. (2013), S. 129.

Behälter mit vormals gesundheitsschädlichem Inhalt handelt¹⁵². Die Behälterreinigung erfolgt in der Regel mithilfe der Strahlreinigung. Im Fall automatischer Reinigungssysteme wird das Reinigungsmedium anhand statischer oder rotierender Düsen unter Druck auf die zu reinigende Oberfläche gelenkt. Für eine möglichst effiziente Reinigung ist der Druck des Reinigungsstrahls an die Stärke der Verunreinigung anzupassen¹⁵³.

Für eine weitere Steigerung der Ressourceneffizienz ist auch der Zeitpunkt der Reinigungsmaßnahme ausschlaggebend. So lässt sich ein Bodensatz bspw. leichter entfernen, wenn er unmittelbar am Ende des Produktionsprozesses aus dem Behälter entfernt wird. Alte Ablagerungen, die im Rahmen der Produktion z. B. bereits mehrmals aufgeheizt und abgekühlt worden sind, führen hingegen zu einem deutlich höheren Reinigungsaufwand. Um diesen kritischen Ablagerungen bereits in ihrer Entstehung vorzubeugen, kann eine veränderte Prozessführung sinnvoll sein. Demnach kann sich bereits eine Anpassung der Halte-/Übergangszeiten positiv auf die Bewuchs-/Bodensatzbildung von Industriebehältern auswirken¹⁵⁴.

Bestimmte Produktionsbehälter (z. B. Papierindustrie) sind aufgrund ihres Inhalts besonders anfällig für die Entstehung von Biofilmen, welche im Rahmen der Produktion zu betriebstechnischen oder hygienischen Komplikationen führen können. Für die industrielle Entfernung von Biofilmen wird in der Regel Desinfektionsmittel oder eine Kombination aus Dispergator und Biozid eingesetzt. Während Biozide Bakterien lediglich abtöten, greifen Dispergatoren direkt an der Grenzfläche an, sodass sich der Biofilm von der betroffenen Oberfläche löst. Zur Kontrolle des Biofilms können zudem entsprechende Vorrichtungen zur Online-Messung der Schichtdicke im Behälter installiert werden. Auf diese Weise lässt sich auch bei der

¹⁵² Vgl. Chrysalidis, A. und Kyzas, G. Z. (2020), S. 23.

¹⁵³ Vgl. Mauermann, M. (2012), S. 10.

¹⁵⁴ Vgl. Goode, K. R. et al. (2013), S. 125 f.

Einleitung von Maßnahmen zur Biofilmbekämpfung jederzeit ein ressourceneffizienter Chemikalieneinsatz gewährleisten¹⁵⁵.

Vollautomatische Reinigungsanlage in der Farben- und Lackindustrie

Ein britischer Farben- und Lackhersteller hat alle Mischaggregat seiner Produktionsanlage mit einer vollautomatischen Behälterinnenreinigung ausgestattet. Da abhängig von der Beschaffenheit der Farbe eine Reinigung mit Wasser bzw. Lösungsmittel erforderlich ist, werden beide Reinigungsmedien zeitgleich in separaten Tanks vorgehalten. Jedes Reinigungsmedium wird über eine separate Hochdruckpumpe in das zu reinigende Behältnis gefördert. Das Reinigungssystem ist über eine SPS in den Produktionsprozess eingebunden, sodass das Unternehmen eine höhere Anlagenausnutzung bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität erreicht¹⁵⁶.

4.2.4 Ressourceneffiziente Anlagenreinigung durch automatisierte CIP-Prozesse

Produktionsanlagen lassen sich mithilfe einer ortsgebundenen Reinigung (Cleaning in Place (CIP)) ohne Zerlegung vollautomatisch säubern. Diese Art der Reinigung ist insbesondere für die Lebensmittelindustrie und den pharmazeutischen Bereich relevant. So müssen besagte Produktionsanlagen bspw. bei einem Rezepturwechsel von den Produktionsresten der vorherigen Charge rückstandsfrei befreit werden, um erneut hygienische Produktionsbedingungen zu schaffen. CIP-Anlagen der Lebensmittelindustrie verfügen zumeist über die Reinigungsstufen Spülen, Desinfizieren und Auskochen. Zur Entfernung größerer Produktionsreste wird zunächst eine Vorspülung der betroffenen Komponenten durchgeführt, gefolgt von der Entfernung organischer Rückstände in Form von Protein- oder Fettablagerungen durch den Einsatz alkalischer Reiniger. Nach einer

¹⁵⁵ Vgl. Henning, K. (2016), S. 73.

¹⁵⁶ Vgl. ReiTec Reinigungstechnik und -systeme GmbH (2023).

Zwischenspülung erfolgt das sogenannte „Absäuern“, d. h. die Entfernung anorganischer Verunreinigungen unter Zugabe saurer Reinigungslösung. Nach einer weiteren Zwischenspülung wird die Anlage desinfiziert, während die Desinfektionsmittelreste zuletzt mit Reinstwasser fortgespült werden¹⁵⁷.

Der Einsatz automatisierter CIP-Anlagen ermöglicht eine zeiteffiziente Reinigung von Produktionsanlagen, die im Gegensatz zu einer manuellen Reinigung auch schwer erreichbare Oberflächen/Anlagenkomponenten zuverlässig säubert. Moderne CIP-Anlagen verfügen u. a. über eine spezielle Sensorik, welche die für die Reinigung relevanten Prozessdaten kontinuierlich erfasst. Diese Prozessdaten werden anschließend durch eine zentrale Steuereinheit analysiert, welche den Reinigungsprozess an die aktuellen Gegebenheiten anpasst.

Auf diese Weise wird eine bedarfsorientierte Reinigung gewährleistet, die nicht nur zu einer Verringerung des Wasserverbrauchs/Chemikalieneinsatzes, sondern auch zu einer Reduzierung der anfallenden Abwassermenge führt. Neben den ökologischen Vorteilen dieser bedarfsorientierten Reinigung ist aus unternehmerischer Sicht eine Steigerung der Produktivität zu erwarten, da mit dem Einsatz von CIP eine Verkürzung der reinigungsbedingten Produktionsunterbrechungen einhergeht¹⁵⁸.

Selbstlernendes Automatisierungssystem für CIP-Anlagen

Im Rahmen eines IGF-Projekts haben das Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) und die Universität Erlangen-Nürnberg ein selbstlernendes Automatisierungssystem für ressourceneffiziente CIP-Prozesse erprobt. Als Use-Case für die CIP-Anlage fungierte ein Edelstahltank (Fassungsvermögen: 10.000 l), welcher über motorgetriebene Zielstrahlreiniger von verschiedenen Lebensmittel-

¹⁵⁷ Vgl. Zeiss, F. (2017).

¹⁵⁸ Vgl. Zeiss, F. (2017).

rückständen befreit wurde. Als Parameter für die selbstlernende Prozesssteuerung dienten die Pumpleistung bzw. der Volumenstrom des Reinigungswassers. Zur Sauberkeitsüberwachung in Echtzeit wurden UV-Sensoren an hygienekritischen Bereichen des Behälters platziert. Die Auswertung der optischen Signale wurden mithilfe moderner Bildverarbeitungsverfahren, in Kombination mit künstlichen neuronalen Netzwerken zur Mustererkennung, durchgeführt. Die gesammelten Daten zum Reinigungszustand des Behälters wurden anschließend an den Zielstrahlreiner übermittelt. Über die schrittweise Anpassung der Reinigungsparameter lernte das System, welche Parameteränderung zu einer Verbesserung der Reinigungsergebnisse führt. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich durch eine derartige intelligente Prozessführung bis zu 55 % der Pumpleistung sowie 35 % des bisherigen Bedarfs an Reinigungswasser einsparen lassen.¹⁵⁹

4.2.5 Rohrreinigung

Neben der industriellen Anlagenreinigung bietet auch die Rohrreinigung erhebliches Potenzial zur Ressourceneffizienzsteigerung von Produktionsprozessen. So kann sich bspw. der Zustand eines Wasserrohrs maßgeblich auf die Durchflussrate und damit auf den Energieverbrauch von Förderpumpen auswirken. Ferner kann eine mangelhafte Wartung bzw. Reinigung von Rohren zu kritischen Ablagerungen/Verstopfungen und damit schlimmstenfalls zum Stillstand einer Produktionsanlage führen. Ebenso können eingeschwemmte Ablagerungen aus Zulaufrohren Materialschäden in Form von Korrosion verursachen, die sich negativ auf die Lebensdauer von Produktionsanlagen oder deren Komponenten auswirken können.

Auch für den störungsfreien Transport von Abwässern/gefährlichen Abfällen ist auf eine regelmäßige Rohrreinigung zu achten. Eine geeignete Methode zur Entfernung der an der Rohrwand vorhandenen Rückstände

¹⁵⁹ Vgl. Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (2019).

bzw. Ablagerungen ist bspw. das Hochdruckwasserstrahlen. Abhängig von der Art der transportierten Abfälle bzw. der Beschaffenheit des zu reinigenden Rohres kann aber auch der Einsatz spezieller Reinigungschemikalien erforderlich sein¹⁶⁰.

Insbesondere Rohrsysteme mit komplexen Geometrien stellen für die industrielle Rohrreinigung oftmals eine Herausforderung dar. So kann z. B. ein gepulster Durchfluss¹⁶¹ dabei helfen, (Produktions-)Rückstände frühzeitig von der Rohrwand zu entfernen und das Rohr vor kritischen Ablagerungen zu schützen.

Nach der Vorstellung der verschiedenen Reinigungs- und Wartungsmaßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von Produktionsanlagen und der (wasserführenden) Peripherie ist das nachfolgende Kapitel einem Leitfaden gewidmet, welcher Unternehmen des produzierenden Gewerbes bei der Planung und Auslegung einer ressourceneffizienten Reinigungsanlage unterstützen soll.

¹⁶⁰ Vgl. Shrestha, G. M. und Niggemann, O. (2014), S. 1.

¹⁶¹ Vgl. Schöler, M.; Fuchs, T.; Helbig, M.; Augustin, W.; Scholl, S. und Majschak, J.-P. (2009), S. 455 f.

5 LEITFADEN – AUSLEGUNG EINER RESSOURCENEFFIZIENTEN REINIGUNGSANLAGE

Für die Planung und Auslegung einer ressourceneffizienten Reinigungsanlage sind durch das beauftragende Unternehmen vorab spezifische Informationen einzuholen. So ist über eine Bestandsaufnahme zu klären, welche Art und Stärke von Verunreinigungen im Rahmen des Fertigungsprozesses zu erwarten sind. Diese Informationen sowie die gewünschte Produktqualität sind wiederum ausschlaggebend für die künftige Reinigungsanforderung und damit für die Wahl des passenden Reinigungsverfahrens bzw. die Festlegung des Reinigungsprozesses, inklusive der Option einer Online-Prozessüberwachung.

5.1 Bestandsaufnahme der zu erwartenden Verunreinigungen

Eine Bestandsaufnahme der im Rahmen des Produktionsprozesses auftretenden Verunreinigungen hilft, den künftigen Reinigungsprozess hinsichtlich Bauteilsauberkeit und Ressourceneinsatz optimal auszulegen. Die Bestimmung der maßgeblichen Oberflächenverunreinigung erfolgt in der Regel über eine mikroskopische Analyse.

Die für die mikroskopische Analyse benötigten Schmutzpartikel werden je nach Beschaffenheit der zu reinigenden Bauteiloberfläche mithilfe eines trockenen oder flüssigen Mediums extrahiert. Bei Bauteilen mit robusten Oberflächen wird hierfür die sogenannte „Nassextraktion“ eingesetzt. Um die Schmutzpartikel von der Bauteiloberfläche zu lösen, wird das Bauteil mit einem gerichteten Strahl abgespritzt. Bei Bauteilen mit empfindlichen Oberflächen wird hingegen die sogenannte „Luftextraktion“ angewendet. Bei dieser Art der Probenahme werden die Bauteile in einer geschlossenen Extraktionskabine mit vorgereinigter Luft abgeblasen und die gelösten Verunreinigungen anschließend aufgefangen. Bei sehr großen Bauteilen, welche die Größe der Extraktionskabine übersteigen, werden die Partikel mit einer Zykloneinheit abgesaugt und anschließend in einer Laborflasche

abgeschieden. Bei einer lediglich geringen Anzahl von Schmutzpartikeln ist auch die direkte Abscheidung auf einem Analysefilter möglich¹⁶².

Findet die Oberflächenkontamination hingegen über die Produktionsumgebung statt, können zur Identifizierung der Schmutzpartikel sogenannte Partikelfallen aufgestellt werden. Die Kenntnis von Kontaminationsquellen in der Produktionsumgebung hilft, den künftigen Reinigungsprozess in puncto Produkthandling und Logistik zu optimieren. So lässt sich bspw. über die Einführung eines Schleusenkonzepts der Eintrag von Schmutzpartikeln aus der Produktionsumgebung unterbinden¹⁶³.

Organische filmische Verunreinigungen lassen sich mithilfe von Fluoreszenzmessungen optisch nachweisen. Wie stark eine Oberfläche verunreinigt ist, kann anhand der gemessenen Fluoreszenzintensität aber nur semiquantitativ bestimmt werden. Die quantitative Erfassung filmischer Verunreinigungen kann jedoch mithilfe der vakuuminduzierten Desorption in Kombination mit einer massenspektrometrischen Untersuchung durchgeführt werden¹⁶⁴.

Für die Bestandsaufnahme der für den künftigen Reinigungsprozess relevanten Verunreinigungen sind seitens des produzierenden Unternehmens daher folgende Fragestellungen¹⁶⁵ zu prüfen:

- Um welche Art von Verunreinigung handelt es sich (filmische oder Partikelverunreinigung)?
- Wie stark ist die Oberfläche verschmutzt? Wie hoch ist die Anzahl der Schmutzpartikel, welche Partikelgröße liegt vor?
- Lässt sich evtl. eine Partikelquelle (z. B. Produktionsumgebung) identifizieren?

¹⁶² Vgl. Müller, Y. (2022), S. 42 f.

¹⁶³ Vgl. Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014), S. 3 f.

¹⁶⁴ Vgl. Schlütersche Fachmedien GmbH (2019).

¹⁶⁵ Vgl. Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014), S. 1.

5.2 Bestimmung der Reinigungsanforderungen

Nachdem die Art und Menge der zu erwartenden Verunreinigungen bekannt sind, können im nächsten Schritt die Reinigungsanforderungen festgelegt werden. Dies ist insofern wichtig, um den Reinigungsprozess einerseits hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs nicht überdimensioniert ausulegen und andererseits den Anforderungen an die technische Sauberkeit gerecht zu werden.

Für die Festlegung der künftigen Reinigungsanforderungen sind seitens des produzierenden Unternehmens daher folgende Fragestellungen¹⁶⁶ zu prüfen:

- Wie hoch muss die Produktsauberkeit sein, damit weder die Qualität des Endprodukts leidet noch die Effizienz des Produktionsprozesses negativ beeinträchtigt wird?
- Welche Sauberkeitsanforderungen werden für die einzelnen Fertigungsschritte benötigt?

Sollten die Anforderungen an die Bauteilsauberkeit für einen Fertigungsschritt nicht hinreichend bekannt sein, sind diesbezüglich die nachfolgenden Fertigungsschritte (Oberflächenbehandlungen, spanende Verfahren etc.) ausschlaggebend. Ferner sind die zur Bestimmung der technischen Sauberkeit eingesetzten Prüf- und Messverfahren entsprechend zu dokumentieren, um im Rahmen der späteren Sauberkeitsüberwachung eine gleichbleibende Produktqualität zu gewährleisten¹⁶⁷.

5.3 Auswahl passender Reinigungstechnologien

Für die Wahl der optimalen Reinigungstechnologie sind neben den erwarteten Verunreinigungen und Anforderungen an die technische Sauberkeit die Art (Material, Geometrie) und Anzahl der zu reinigenden Bauteile ausschlaggebend. So ist bei großen Chargenmengen auf eine hohe Reini-

¹⁶⁶ Vgl. Liebl, D. S. (1993), S. 1.

¹⁶⁷ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020), S. 5.

gungskapazität zu achten, während bei empfindlichen Bauteilen u. a. der Einsatz eines materialschonenden Reinigungsmediums obligatorisch ist¹⁶⁸. Insbesondere bei einer nasschemischen Reinigung ist der Reiniger auf die vorhandenen Verunreinigungen abzustimmen¹⁶⁹. Für die Wahl des passenden Reinigers sollte jedoch nicht nur die Reinigungswirkung, sondern auch dessen Umweltwirkung z. B. im Rahmen der Abwasserbehandlung/-entsorgung berücksichtigt werden.

Zur Risikominimierung ist die Reinigungswirkung der ausgewählten Reinigungstechnologie zunächst an originalverschmutzten Bauteilen zu prüfen. Bei der Planung der Vorversuche ist auf möglichst praxisnahe Versuchsbedingungen zu achten (z. B. vergleichbare Chargierung, Anzahl der zu reinigenden Bauteile). Die Vorversuche fungieren gleichzeitig zur Identifizierung der späteren Reinigungsparameter (erforderliche Behandlungszeit, optimales Reinigungsmedium etc.)¹⁷⁰. Eine anschließende Qualitätskontrolle dient zur Prüfung der Reinigungseffektivität. Für den Vergleich verschiedener Reinigungstechnologien kann hier auch der Einsatz speziell präparierter Prüfkörper sinnvoll sein. Diese verfügen über eine definierte Tracer-Kontamination und erlauben so eine direkte Sauberkeitsbestimmung ohne Extraktionsverluste¹⁷¹.

Eine Alternative zu den vergleichsweise aufwendigen Voruntersuchungen bietet die Prozesssimulation. So lassen sich mithilfe spezieller Simulationssysteme verschiedene Reinigungsparameter einstellen und über virtuelle Tests die optimale Reinigungstechnologie ermitteln¹⁷².

¹⁶⁸ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020), S. 3 f.

¹⁶⁹ Vgl. Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018), S. A10f.

¹⁷⁰ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020), S. 9 f.

¹⁷¹ Vgl. Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014), S. 5.

¹⁷² Vgl. Wullstein, M. (2004), S. 80.

5.4 Konzeptionierung des Reinigungsprozesses

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen bzw. der Prozesssimulation fließen elementar in die verfahrenstechnische Gestaltung des Reinigungsprozesses (ein- oder mehrstufige Reinigung) und damit in die Anzahl der erforderlichen Anlagenkomponenten (Reinigungsstufen, Bauteiltrocknung etc.) ein. Ebenso liefern besagte Ergebnisse die Grundlage zur Berechnung der für den Reinigungsprozess erforderlichen Anlagenleistung (Pumpen etc.). Für die Dimensionierung der Reinigungsanlage ist wiederum die geforderte Reinigungskapazität ausschlaggebend. So sind bspw. das Teilehandling, inklusive des Designs der Werkstückträger, sowie die Auslegung der Medienversorgung (Wasser, Druckluft, Prozessdampf etc.) auf den geplanten Durchsatz abzustimmen¹⁷³.

Hohe Durchsätze lassen sich verfahrenstechnisch u. a. mit Durchlaufanlagen oder durch einen hohen Automatisierungsgrad erreichen. Jedoch geht ein derartig gestalteter Reinigungsprozess zu Lasten der technischen Sauberkeit. Mehrstufenreinigungen sowie Batchprozesse können diesbezüglich Abhilfe schaffen, allerdings sind diese Reinigungsprozesse ohne entsprechende Automatisierung äußerst zeitintensiv. Die in Tabelle 1 dargestellte Entscheidungsmatrix hilft, Reinigungsprozesse im Hinblick auf die technische Sauberkeit/den Durchsatz verfahrenstechnisch abzustimmen.

Die Automatisierung von Reinigungsprozessen, insbesondere des Teilehandlings, trägt maßgeblich zur Durchsatzerhöhung bei. Dies ist jedoch mit einem hohen Kostenaufwand verbunden, der vor allem kleine Unternehmen vor wirtschaftliche Herausforderungen stellen kann. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hilft, den Nutzen der Automatisierung gegenüber dem unternehmerischen Risiko abzuwägen¹⁷⁴.

¹⁷³ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020), S. 5 f., 9 f.

¹⁷⁴ Vgl. Schulz, D. und Itasse, S. (2020).

Tabelle 1: Verfahrenstechnische Auslegung von Reinigungsprozessen nach Durchsatz bzw. Sauberkeitsanforderung¹⁷⁵

Verfahrenstechnische Auslegung des Reinigungsprozesses	Sauberkeit		Durchsatz	
	gering	hoch	gering	hoch
+ Geringe Automatisierung + Einfache Reinigungsverfahren	x		x	
+ Batchreinigung + Mehrstufige Reinigung + Bewegung des Reinigungsgutes		x	x	
+ Hohe Automatisierung + Durchlaufreinigungsanlagen + Schnelle Reinigungsverfahren	x			x
+ Hohe Automatisierung + Durchlaufreinigungsanlagen + Kombinierte Reinigungsverfahren + Mehrstufige Reinigung		x		x

Die verfahrenstechnische Konzeptionierung einer Reinigungsanlage beinhaltet auch die Entwicklung eines Abfall-/Abwassermanagements. Vor dem Hintergrund der Entsorgung sind seitens des produzierenden Unternehmens daher folgende Fragestellungen¹⁷⁶ zu klären:

- Ist eine Direkt- oder Indirekteinleitung von Abwässern geplant?
- Ist eine eigene Abwasseraufbereitung vorgesehen und wenn ja, wie könnte diese aussehen?
- Ist die interne/externe Rückgewinnung von Reinigungsmitteln geplant?
- Welche Abfälle (Ölrückstände, Schlämme usw.) sind im Rahmen des Reinigungsprozesses zu erwarten und wie werden diese innerbetrieblich gehandhabt?
- Ist eine Abluftabgabe ins Freie möglich oder ist eine zusätzliche Abluftreinigungsanlage notwendig? (Stichwort: höherer Kostenaufwand)

¹⁷⁵ Vgl. Junge, F. (2018), S. 7.

¹⁷⁶ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020), S. 6.

Ferner sei an dieser Stelle angemerkt: Liegt für die Neuanlage eine ausreichend große Fläche vor, lässt sich durch eine möglichst geradlinige Rohrleitungsführung (Vermeidung von Knicken, Bögen, Winkeln) die notwendige Pumpleistung und damit der Energieverbrauch reduzieren¹⁷⁷.

Flexibles Anlagenkonzept – Simultane Teilereinigung/-beschichtung

Ein führender Anbieter für hydraulische Antriebs- und Steuertechnik in der Mobil- und Stationärhydraulik hat eine Produktionsanlage entwickelt, die die Reinigung und Beschichtung der Hydraulikaggregate auf einer einzigen Anlage flexibel und platzsparend kombiniert. Die Anlage zeichnet sich u. a. durch einen reduzierten Energieverbrauch aus. So ist die Zu-/Abluft der Lackierkabine z. B. mit einem Kreuzstromwärmetauscher ausgestattet. Die Anlage verfügt außerdem über eine intelligente Intralogistik, sodass innerhalb der Produktion kurze Wegstrecken gewährleistet sind. So kommt für den Transport der Hydraulikaggregate innerhalb der Produktionsanlage eine Rollenbahn zum Einsatz. Die Anlage ist als Durchlaufanlage konzipiert, sodass eine Feinstreinigung bei gleichzeitig hoher Durchlauftrate erzielt werden kann. Die Reinigung erfolgt lösungsmittelbasiert, kann aber je nach Bedarf auf andere Reinigungsmedien umgerüstet werden. Der Reinigungsprozess erfolgt in drei Stufen: Zu Beginn wird eine Tauchreinigung durchgeführt, gefolgt von einer Dampfreinigung zur Entfettung und einer abschließenden rückstandsfreien Trocknung. Die gereinigten Hydraulikkomponenten gelangen anschließend durch einen Kühltunnel zur Lackieranlage. Alle Reinigungsschritte werden unter Vakuum bei erhöhter Temperatur realisiert. Durch die permanente Destillation des Reinigungsmediums wird zudem eine gleichbleibend hohe Lösungsmittelqualität garantiert. Die klare Trennung von Sauber- und Kontaminationsbereich verhindert Kreuzkontaminationen, sodass ausschließlich saubere Teile den Lackierbereich erreichen¹⁷⁸.

¹⁷⁷ Vgl. Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2017); Schulz, D. (2022).

¹⁷⁸ Vgl. Högel, R. (2014), S. 44 f.

5.5 Überwachungs- und Qualitätssicherungsmaßnahmen

Für einen möglichst ressourceneffizienten Reinigungsprozess sollten Neuanlagen zusätzlich mit Technologien zur (Online-)Überwachung ausgestattet werden. Hierzu zählt nicht nur die Überwachung der Bauteilsauberkeit zur Sicherung der Produktqualität, sondern ebenso die Zustandsüberwachung der eingesetzten Reinigungsmedien. So läge bei einer nasschemischen Reinigung der Fokus bspw. auf einer Online-Zustandsüberwachung der Reinigungsbäder und Spüllösungen hinsichtlich Verschmutzungsgrad und/oder Reinigerkonzentration¹⁷⁹.

Eine derartige Überwachung von Reinigungsprozessen lässt sich insbesondere über IoT-Maßnahmen erreichen. Hierfür werden an strategisch wichtigen Punkten der Reinigungsanlage vernetzte Sensoren installiert, die eine permanente Erfassung der Prozessparameter und damit eine Prozessüberwachung/-steuerung in Echtzeit ermöglichen.

Die nachfolgend aufgeführten Maßnahmen und Fragestellungen¹⁸⁰ dienen als Hilfestellung für die praktische Umsetzung einer ebensolchen Echtzeit-Prozesssteuerung und sollen sie Leserinnen und Leser ermutigen, auch weiterführende Digitalisierungsmaßnahmen wie den Einsatz von KI in Betracht zu ziehen.

(1) Auswahl und Installation passender Prozess-Sensorik

- (a) Was soll gemessen werden bzw. welche Sensorik ist für diesen Zweck geeignet?
- (b) An welcher Stelle im Reinigungsprozess ist die Installation von Sensorik strategisch sinnvoll?

¹⁷⁹ Vgl. Zachmann, T. (2024), S. 3.

¹⁸⁰ Vgl. Schlauchservice Baumann GmbH (2024).

(2) Konnektivitätshardware und Softwareschnittstellen für den Datentransfer

- (a) Entwicklung einer Konnektivitätsstrategie, das beinhaltet:
 - (i) Welche Reichweite wird benötigt? (Stichwort: Skalierung)
 - (ii) Wie hoch muss die Datenübertragungsrate sein? (Stichwort: Kapazität)
 - (iii) Müssen auch ältere Bestandsanlagen in das System integriert werden? (Stichwort: Kompatibilität)

(3) Zentrale Softwareplattform zur Erfassung und Analyse der gesammelten Prozessdaten

- (a) Die Softwareplattform ist so zu gestalten, dass sie eine umfangreiche Verarbeitung der gesammelten Prozess- und Anlagendaten (z. B. Reinigungsfortschritt, Reinigungsumgebung bzw. Zustand der Reinigungsanlage zwecks Predictive Maintenance) ermöglicht.
- (b) Ist der Einsatz von KI-Maßnahmen wie Machine Learning vorgesehen? (Stichwort: Mustererkennung, Prozessoptimierung/Automatisierung durch Ableitung von ReinigungsROUTINEN)

(4) Echtzeit-Prozesssteuerung auf Basis der analysierten Daten

- (a) Ist eine Fernüberwachung/-steuerung der Reinigungsanlage vorgesehen?
- (b) Ist eine automatisierte Anpassung des Reinigungsprozesses auf Basis der Prozessdatenanalyse geplant?

Die Überwachung der Bauteilsauberkeit kann anhand der in Kapitel 4.1.2 genannten Methoden durchgeführt werden. Als Referenz für die geforderte Bauteilsauberkeit können bei Inbetriebnahme der Anlage die Ergebnisse aus den entsprechenden Vorversuchen (vgl. Kapitel 5.2) dienen.

Nach der Vorstellung des Leitfadens sollen abschließend eine kurze Zusammenfassung der bisherigen Inhalte dieser Kurzanalyse sowie ein Überblick über die aktuellen Trends und Herausforderungen der industriellen Anlagen- und Bauteilreinigung gegeben werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ressourceneffiziente Reinigungsverfahren spielen für die erfolgreiche Etablierung nachhaltiger Fertigungsprozesse eine maßgebliche Rolle. So ermöglicht ein optimal auf das Reinigungsgut (Bauteile/-komponenten) bzw. auf die zu reinigende Produktionsanlage, z. B. (Produktions-)Behälter, Rohrleitungen, Wärmetauscher, abgestimmter Reinigungsprozess nicht nur die Einsparung von Ressourcen (Reinigungsmedien, Energie), sondern auch eine Reduzierung des Abfall- bzw. Abwasseraufkommens sowie der (in)direkten CO₂-Emissionen.

Produzierende Unternehmen profitieren durch ressourceneffiziente Reinigungsprozesse langfristig von einer Verringerung der Betriebskosten, aber auch von einer Verbesserung des Unternehmensimages in puncto Nachhaltigkeit, Klima- und Umweltschutz. Letzteres kann zudem einen Wettbewerbsvorteil gegenüber Mitbewerber*innen bedeuten, sodass Neukund*innen gewonnen bzw. der bisherige Kund*innenstamm gefestigt wird. Auch hinsichtlich steigender Umweltauflagen ist die frühzeitige Berücksichtigung von Ressourceneffizienz bereits ab dem Planungsprozess von Reinigungsanlagen für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen von entscheidender Bedeutung.

Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung ressourceneffizienter Reinigungsprozesse ist ein Verständnis der grundlegenden Reinigungsmechanismen und der im Rahmen von Fertigungsprozessen relevanten Oberflächenverunreinigungen. Zur Optimierung des Ressourcenverbrauchs ist das Reinigungsverfahren auf die jeweilige Reinigungssituation abzustimmen. Die Wahl der optimalen Reinigungsparameter erfordert hierbei umfassende Kenntnisse zu den erwarteten Verunreinigungen (Menge, Zusammensetzung) sowie der Beschaffenheit (Menge, Bauteilgeometrie) und den Materialeigenschaften (z. B. Robustheit) des Reinigungsgutes.

Die Anforderung an die technische Sauberkeit gibt wiederum die Reinigungsintensität bzw. die Anzahl der benötigten Reinigungsstufen vor. Ist

außerdem eine hohe Reinigungskapazität gefordert, stellt insbesondere die (Teil-)Automatisierung von Reinigungsanlagen eine geeignete Maßnahme zur Durchsatzerhöhung industrieller Reinigungsprozesse dar.

Potenzial zur weiteren Ressourceneffizienzerhöhung der industriellen Bauteil-/Anlagenreinigung bietet derzeit vor allem die Digitalisierung von Reinigungsprozessen im Sinne von Industrie 4.0. So lassen sich die im Rahmen von IoT-Maßnahmen und Big Data gesammelten Prozess- und Anlagendaten bspw. in Form von Predictive Maintenance zur Erhöhung der Anlagenlaufzeit nutzen¹⁸¹ oder Reinigungsprozesse mithilfe digitaler Zwillinge anhand simulierter Produktionsszenarien robuster und ressourceneffizienter gestalten¹⁸².

Für KMU mit begrenztem Investitionsvolumen bietet vor allem das Retrofitting bestehender Reinigungsanlagen eine attraktive Option zur Erhöhung der innerbetrieblichen Ressourceneffizienz. So stellt z. B. die Integration einer Prozessüberwachung/-steuerung auf Basis von Echtzeitdaten einen vielversprechenden Ansatz dar, um Reinigungsmedien und Energie einzusparen bzw. die Reinigungsqualität zu verbessern und damit Fehlchargen zu vermeiden. Ebenso kann die ganzheitliche Betrachtung bestehender Reinigungsprozesse unter dem Aspekt der technischen Sauberkeit helfen, Ressourceneffizienzpotenziale auch innerhalb der Prozessführung zu identifizieren. So kann bspw. die Einführung von Zwischenreinigungsstufen das Auftreten stark verunreinigter Komponenten verhindern, sodass die Reinigung einen geringeren Ressourceneinsatz (Spülwasser etc.) erfordert.

Ferner trägt die regelmäßige Reinigung von Produktionsanlagen/-behältern sowie der Rohre und wasserführenden Peripherie (z. B. Kühltürme, Wärmeübertrager, Prozessdampfbereitstellung) maßgeblich dazu bei, die Effizienz von Produktionsprozessen zu verbessern und damit den

¹⁸¹ Vgl. Tennant GmbH & Co. KG (2024).

¹⁸² Vgl. Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST (2022), S. 54 f.

Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen produzierender Unternehmen zu reduzieren.

Zukunftstrends und Herausforderungen der industriellen Bauteil-/Anlagenreinigung

Der Automotive-Bereich fungiert derzeit als einer der Haupttreiber für die technische Sauberkeit, da hier bereits nach heutigem Stand der Technik Verunreinigungen im Mikrometerbereich zu Fehlfunktionen bei elektronischen Fahrzeugsystemen (Antiblockiersystemen etc.) führen können¹⁸³.

Weitere Herausforderungen für die industrielle Bauteilreinigung bestehen im Bereich moderner Fertigungs- und Fügetechniken (additive Fertigung bzw. Kleb- und Laserschweißverbindungen) sowie neuer Werkstoffe und Verbundmaterialien. Diese benötigen innovative Reinigungsprozesse, die optimal auf das Material und die Geometrie des zu reinigenden Bauteils abgestimmt sind. Ferner müssen industrielle Reinigungsprozesse auch in Zukunft der Forderung nach mehr Ressourceneffizienz und Flexibilität bei gleichzeitiger Steigerung der Wirtschaftlichkeit gerecht werden. Vielversprechende Ansätze bieten hier die Automatisierung sowie die Integration industrieller Reinigungsprozesse im Rahmen einer vernetzten Produktion.

So wird u. a. die Verwendung von Cloudlösungen hinsichtlich einer Echtzeit-Prozesssteuerung, aber ebenso der Robotereinsatz im Teilehandling auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Ferner weisen aktuelle Trends darauf hin, dass insbesondere Trockenreinigungsverfahren für die industrielle Bauteilreinigung an Relevanz gewinnen werden¹⁸⁴.

¹⁸³ Vgl. Gommel, U. und Kreck, G. (2022), S. 1.

¹⁸⁴ Vgl. Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH (2019).

Im Rahmen der Behälterreinigung ist vor allem die Vermeidung bzw. Bekämpfung des Biofilmwachstums Gegenstand der Forschung. So werden derzeit biofilmresistente Beschichtungen für Stahlbehälter, aber auch umweltfreundlichere Chemikalien zur Biofilmentfernung entwickelt¹⁸⁵.

¹⁸⁵ Vgl. Goode, K. R.; Asteriadou, K.; Robbins, P. T. und Fryer, P. J. (2013), S. 140.

LITERATURVERZEICHNIS

acp systems AG (2019): Trockene Reinigung erhöht die Effizienz [online] – quattroClean-Schneestrahlenreinigung vor der Kunststofflackierung [abgerufen am: 19.06.2024], verfügbar unter: https://www.acp-systems.com/wp-content/uploads/2019/03/Kunststoff-Institut-L%C3%BCdenscheid_03.2019.pdf

Angerer, K.; Hohmann, A.; v. Seifert und Tammer, C. (2019): Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Reinigungstechnologien in der industriellen Produktion. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [abgerufen am: 30.07.2024], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/publikationen/studien/>

aqua-Technik Beratungs GmbH (2024a): Chemie für Dampfkessel und Kesselspeisewasser – aber richtig! [online] – Welche Chemikalien eignen sich für die Aufbereitung von Kesselspeisewasser? [abgerufen am: 30.07.2024], verfügbar unter: <https://aqua-technik-gmbh.de/chemie-dampfkessel-kesselspeisewasser/>

aqua-Technik Beratungs GmbH (2024b): Wie funktioniert ein Kühlturm? [online] – Wissenswertes über Funktionsweise, Bauweisen und Risiken von Kühltürmen, Verdunstungskühlanlagen und Rückkühlern [abgerufen am: 25.07.2024], verfügbar unter: <https://aqua-technik-gmbh.de/kuehlturm-funktion/>

Arena Comet NV (2024): Entlackung und Kunststoffentfernung [online] – Thermisches Reinigungssystem für Metallwerkzeuge und Maschinenteile [abgerufen am: 03.05.2024], verfügbar unter: <https://www.arenacomet.eu/page/wirbelbett-scirocco/f1.html>

bip technology GmbH (2024): EUROSORB® - Trockenentfettung [online] – Ökologisch und Klimaneutral. Entfetten Sie "GRÜN"! [abgerufen am: 24.10.2024], verfügbar unter: <https://www.eurosorb-trockenentfettung.de/>

Bitter, E. (2021): Behälter reinigen mit digitalem Zwilling [online] [abgerufen am: 28.06.2024], verfügbar unter: <https://www.achema.de/de/magazin/artikel/digital-twin-makes-for-clean-cosmetics-tanks>

Braun, R.; Klümper-Westkamp, H. und Huchel, U. (2018): Vermeidung von Sperrschichten auf nitrierten Bauteilen – Eine Anleitung zum Handeln. In: "AWT Info" HTM Journal of Heat Treatment and Materials, **73** (4), A8–A11 [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/105.018045/pdf>

Büchter, E. (2012): A Green Way to Clean – Laser Cleaning – Compact laser systems for industrial cleaning, coating removal and surface preparation. In: Laser Technik Journal, 9 (5), S. 36 – 38 [abgerufen am: 18.01.2024], verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/latj.201290068>

BVL Oberflächentechnik GmbH (2023): Effiziente Anlage für komplexe Reinigungsaufgaben [online] – Unterschiedlich hohe Getriebegehäuse in kurzer Taktzeit reinigen [abgerufen am: 28.06.2024], verfügbar unter: <https://mav.industrie.de/anlagen-verfahren/effiziente-anlage-fuer-komplexe-reinigungsaufgaben/>

Carreño-Olejua, R. (2014): Entwicklung eines Verfahrens zum Schneiden und Schälen von Obst mit Hochdruckwasserstrahlen. Dissertation, Kassel [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: <https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/2014031945221/Dissertation-ReneCarrenoOlejua.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Chawla, M. K. (2001): Cleanliness Verification and Defining acceptable Cleanliness Levels. In: Surface Engineering, 17 (5), S. 413 – 417 [abgerufen am: 22.01.2024], verfügbar unter: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1179/026708401101517980>

Chrysalidis, A. und Kyzas, G. Z. (2020): Applied Cleaning Methods of Oil Residues from Industrial Tanks. In: Processes, 8 (569) [abgerufen am: 18.01.2024], verfügbar unter: https://mdpi-res.com/d_attachment/processes/processes-08-00569/article_deploy/processes-08-00569-v2.pdf?version=1590654634

Deixelberger, P.; Steiner, J.; Schabbauer, K.; Koglgruber, F.; Wrulich, H. und Fresner, J. (2010): Entlacken als Dienstleistung, Rottenmann (Österreich) [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: https://nachhaltig-wirtschaften.at/resources/fdz_pdf/endbericht_1045_entlacken.pdf?m=1646753653&

Dürr, H.; Wildbrett, G. (2006): Grundvorgänge bei Verschmutzung und Reinigung. In: Wildbrett, G.: Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie, 2. Auflage, Hamburg: Behrs. ISBN 3-89947-177-6

Ehricht, S.; Grimme, R.; Mack, O.; Meyer, M.; Raquet, M. und Zorn, C. (2019): Forschungsprojekt zur Adaption der CO₂-Schneestrahls-technologie zur Reinigung empfindlicher schadstoffbelasteter Oberflächen von Kulturgütern am Beispiel von historischen Musikinstrumenten. – Bericht zu den Forschungsergebnissen im Projekt AZ 32275. gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Stuttgart [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32275_01-Hauptbericht.pdf

Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2017): Checkliste zur Optimierung der Energieeffizienz von Reinigungsanlagen [online] [abgerufen am: 29.02.2024], verfügbar unter: https://www.fit-online.org/fileadmin/05_publicationen/checklisten/2020_Checkliste_Energieeffizienz_von_Reinigungsanlagen_Web.pdf

Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2020): Checkliste zur Planung eines Reinigungsprozesses [online] [abgerufen am: 29.02.2024], verfügbar unter: https://www.fit-online.org/fileadmin/05_publicationen/checklisten/2020_ChecklisteRP_Web.pdf

FIT Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. (2022): Reinigungsmedien [online] [abgerufen am: 02.04.2024], verfügbar unter: <https://www.fit-online.org/reinigungstechnik/reinigungsmedien>

Flemming, H.-C. (2020): Biofilme - das Leben am Rande der Wasserphase. In: Nachrichten aus der Chemie, 48, S. 442 – 447 [abgerufen am: 27.02.2024], verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Hans-Curt-Flemming/publication/298880020_Biofilms_-_Life_on_the_edge_of_the_aqueous_phase/links/5784b86208aee45b844460b2/Biofilms-Life-on-the-edge-of-the-aqueous-phase.pdf

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (2019): Mit künstlicher Intelligenz ressourceneffizient gereinigt: Forscher entwickeln selbstlernendes Automatisierungssystem für die Reinigung von Produktionsanlagen [online] [abgerufen am: 28.06.24], verfügbar unter: <https://www.feibonn.de/PRINT/geoerderte-projekte/best-practice-projekte/bpp-2019-06-automatisierte-reinigung>

Fraunhofer Reinigung (2013): Presseinformation [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: <https://idw-online.de/de/attachment-data29831.pdf>

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung und Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (2008): Spaltgängigkeit bei der Plasmareinigung – AiF-Forschungsvorhaben 14.849 BG. Gemeinsamer Abschlussbericht, Bremen [abgerufen am: 25.02.2024], verfügbar unter: <https://oa.tib.eu/renate/server/api/core/bitstreams/30638086-2e68-49c0-a974-113d413915de/content>

Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST (2022): Jahresbericht 2021, Braunschweig [abgerufen am: 15.08.2024], verfügbar unter: https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/Fraunhofer_IST_Jahresbericht_2021_DE_Web.pdf

Gaube, D. und Finus, F. (14.05.2018): Trockenentfettung von Bauteilen – ohne Wasser und Chemie [abgerufen am: 24.07.2023], verfügbar unter: <https://www.blechnet.com/trockenentfettung-von-bauteilen-ohne-wasser-und-chemie-a-704781/>

Gommel, U. und Kreck, G. (2022): A short Introduction to Cleanliness Technology: Meeting the future Challenges [online]. In: Cleanroom Technologies Society of Turkiye, Hg. 50 Young Professionals, Antalya (Türkei) [abgerufen am: 22.01.2024], verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/c4c0b29d-f9f0-46b5-a7ff-2a1209c3af9a/content>

Gommel, U.; Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2014): Particulate cleanliness and cleaning validation in fields ranging from automotive industry to medical devices [online]. In: ICCCS, Hg. International Symposium on Contamination Control, Seoul [abgerufen am: 22.01.2024], verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/aeff0737-ba70-4da3-91fa-39f4dd952eac/content>

Goode, K. R.; Asteriadou, K.; Robbins, P. T. und Fryer, P. J. (2013): Fouling and Cleaning Studies in the Food and Beverage Industry Classified by Cleaning Type. In: Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12, S. 121 – 143 [abgerufen am: 19.01.2023], verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Kylee-Goode/publication/264618179_Fouling_and_Cleaning_Studies_in_the_Food_and_Beverage_Industry_Classified_by_Cleaning_Type/links/5ae9b724aca2725dabb61f65/Fouling-and-Cleaning-Studies-in-the-Food-and-Beverage-Industry-Classified-by-Cleaning-Type.pdf

Grefkes, M. (2020): Trinkwasserhygiene – klare Gewissheit, sauberes Wasser [online] [abgerufen am: 11.06.2024], verfügbar unter: <https://www.grefkes.de/trinkwasserhygiene/>

Gümpel, P.; Kässer, M.; Eisenbeis, M. und Kreikenbohm, R. (2009): Mikrobiell induzierte Korrosion am Beispiel Kühlwassersystem [online] [abgerufen am: 27.02.2024], verfügbar unter: <https://hps.hs-regensburg.de/~heh39273/aufsaeetze/mic-beispiel.pdf>

Haase, B. (1996): Bauteilreinigung - Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen – Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen, expert verlag, Malsheim.

Habermacher, S. (2021): Strahlverfahren zur Reinigung – wann ist es sinnvoll? [online] [abgerufen am: 12.04.2024], verfügbar unter: <https://spz-ag.ch/stahlverfahren-zur-reinigung-wann-ist-es-sinnvoll/>

Havighorst, L. und Lindemann, E. (2023): Kühlwassersysteme ohne Biocideinsatz betreiben – Kosteneffiziente und umweltfreundliche Wasserbehandlung für Kühlsysteme. In: CITplus, (10), S. 34 – 35 [abgerufen am: 26.02.2024], verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/e47b4842-4e19-4ddc-ba4e-e0d53227da3d>

Henning, K. (2016): KOLB Kolloquium – Biofilm verbindet Industrien. In: sofwjournal, 142 (04), S. 72 – 79 [abgerufen am: 26.02.2024], verfügbar unter: https://www.swissatest.ch/files/downloads/9c27af55447950d16fbacde69091346a/0416_s%C3%B6fw%20Kolb_kolloquium%20_D.pdf

Högel, R. (2014): Reinigen und Lackieren am laufenden Band – Flexibles Anlagenkonzept. In: Journal für Oberflächentechnik, 54, S. 44 – 47 [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: <https://emo-ot.de/kundendaten/flexibles-anlagenkonzept.pdf>

Holzapfel, Y. und Kreck, G. (2013): Technische Sauberkeit: Bestimmung der partikulären Reinheit – von der Automobilindustrie bis zur Medizintechnik. In: reinraum online, 7, S. 6 – 9 [abgerufen am: 26.02.2024], verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/9504f7a2-eab5-40b2-ae0e-2e0ac59de1b0/content>

Indusclean NV (2016): Thermal Cleaning [online] – An effective paint-stripping technique refined over several iterations [abgerufen am: 30.04.2024], verfügbar unter: <https://indusclean.com/en/services/cleaning/thermal-cleaning/>

Isler, K. (2024): Digitalisierung in der Reinigungsbranche: Einsparpotenziale durch IT-Technologien [online] [abgerufen am: 28.06.2024], verfügbar unter: <https://www.hagel-it.de/it-insights/digitalisierung-in-der-reinigungsbranche-einsparpotenziale-durch-it-technologien.html>

IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024a): Dampfkessel - Reinigung und Entkalkung [online] [abgerufen am: 29.07.2024], verfügbar unter: http://www.is-v.de/dampfkessel_reinigung_entkalkung.php

IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024b): Kühlturm - Reinigung und Entkalkung [online] [abgerufen am: 25.07.2024], verfügbar unter: http://www.is-v.de/k%C3%BChlturm_entkalkung_reinigung.php#wartungsintervall_k%C3%BChlturm

IS-V Sven Reithmeyer GmbH (2024c): Wärmetauscher - Entkalkung und Reinigung [online] [abgerufen am: 25.07.2024], verfügbar unter: http://www.is-v.de/w%C3%A4rmetauscher_reinigung_entkalkung.php

Jones, L. K. (1965): Verification of Cleanliness - What does it mean?, Los Angeles, Sandia Corporation: Reprint [abgerufen am: 22.01.2024], verfügbar unter: <https://www.osti.gov/servlets/purl/4586505>

Junge, F. (2018): Ein Beitrag zur Energieeffizienzbewertung von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen. Dissertation, Darmstadt [abgerufen am: 01.03.2024], verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8776/1/190708.pdf>

Keding Rechenzentrum Reinigung & IT-Sanierung (2024): Automatisierung in der Reinigung mit Technologien und Robotern [online] [abgerufen am: 16.06.2024], verfügbar unter: <https://www.rechenzentrumreinigung.eu/ueber-uns/it-themen/automatisierung-in-der-reinigung-mit-technologien-und-robotern.html>

Knorr-Bremse AG (23. April 2020): Wiedergeburt [online] [abgerufen am: 30.07.2023], verfügbar unter: <https://www.knorr-bremse.com/de/magazin/wiedergeburt.json>

Köchel, M.; Richter, A. und Sobotta, R. (2017): Qualifizierung von Ultraschallgeräten [online]. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hg. DAGA 2017 - 43. Jahrestagung für Akustik, Berlin, 608-610 [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2017/data/articles/000183.pdf

Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH (2019): Automation und Vernetzung liegen auch in der Reinigungstechnik im Trend [online] [abgerufen am: 15.08.2024], verfügbar unter: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/automation-und-vernetzung-liegen-auch-in-der-reinigungstechnik-im-trend/>

Krebs, M. und Oeken, N. (2011): Entwicklung eines Vibrationsreinigungsverfahrens für die industrielle, ressourcenschonende Bauteilreinigung (ViReBa) – Schlussbericht [abgerufen am: 01.03.2024], verfügbar unter: https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/27617/1/BMBF330862A-C_Schlussbericht_oeffentlich.pdf

Krebs, M. und Zwinkau, R. (2014): Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben Reinheitsgerechte Materialflusssysteme der Forschungsstelle(n) TU Dortmund, Institut für Produktionssysteme, Professur für Arbeits- und Produktionssysteme – IGF-Forschungsvorhaben 17495 N/1, Dortmund [abgerufen am: 22.01.2023], verfügbar unter: https://gvb-ev.de/wp-content/uploads/2021/02/forschungsergebnisse_33.pdf

Lehmann, S. und Di Figlia, M. (2021): Digitale Zwillinge: Eine Chance für die Reinigungsbranche? [online]. In: DTO Consulting GmbH, Hg. Unsere beliebtesten Fachartikel der letzten Jahre, Düsseldorf, S. 85–86 [abgerufen am: 19.06.2024], verfügbar unter: <https://dto-research.com/de/aktuelles/fachartikel/341-digitale-zwillinge-eine-chance-fuer-die-reinigungsbranche>

Liebl, D. S. (1993): Industrial Cleaning Source Book, Madison [abgerufen am: 18.01.2024], verfügbar unter: <https://p2infohouse.org/ref/17/16850.pdf>

Liu, W.; Zhang, B.; Li, M. Z.; Li, Y. und Zhang, H.-C. (2013): Study on Remanufacturing Cleaning Technology in Mechanical Equipment Remanufacturing Process [online]. In: Nee, A.Y.c.; Song, B. und Ong, S.-K., Hg. Re-engineering Manufacturing for Sustainability. *Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore 17-19 April, 2013*, Springer Singapore, S. 643 – 648 [abgerufen am: 19.01.2024], verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Hong-Chao-Zhang/publication/283271741_Study_on_remanufacturing_cleaning_technology_in_mechanical_equipment_remanufacturing_process/links/562fe11608aed649430e02ab/Study-on-remanufacturing-cleaning-technology-in-mechanical-equipment-remanufacturing-process.pdf

LPW Reinigungssysteme GmbH (2016): MANUAL 1.0 [online] – Industrielle Teilereinigung: Fakten, Erfahrungen und relevante Aspekte zusammengefasst. [abgerufen am: 29.02.2024], verfügbar unter: <https://www.lpw-reinigungssysteme.de/data/uploads/manual/LPW-Handbuch.pdf>

Mauermann, M. (2012): Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immmergierten Systemen der Lebensmittelindustrie. Dissertation [abgerufen am: 23.02.2024], verfügbar unter: <https://d-nb.info/1067732306/34>

Meissner AG (2024): Automatisierte Trockeneisreinigung [online] [abgerufen am: 19.06.2024], verfügbar unter: <https://www.meissner.eu/2024/01/24/automatisierte-trockeneisreinigung/>

Miorini, T.; Buchrieser, V.; Buchrieser, N. und Enko, M. T. (2016): Grundlagen der Medizinprodukteaufbereitung [online]. In: Österreichische Gesellschaft für Sterilgutversorgung, Hg. Weiterbildung Sterilgutversorgung. (*Fachkundelehrgang I*). Lehrgangsunterlagen [abgerufen am: 23.02.2024], verfügbar unter: https://oegsv.com/wp/wp-content/uploads/03-FK-1_Grundlagen-der-MP-Aufbereitung_Miorini.Buchrieser-2016.pdf

mo – Magazin für Oberflächentechnik (2020): Verunreinigungen und Sauberkeit [online] [abgerufen am: 13.03.2024], verfügbar unter: <https://oberflaeche.de/wissen/grundlagen/reinigungstechnik/verunreinigungen-und-sauberkeit>

mo – Magazin für Oberflächentechnik (2024): Lexikon Oberflächentechnik [online] [abgerufen am: 14.03.2024], verfügbar unter: <https://oberflaeche.de/wissen/lexikon>

Müller, Y. (2022): Spritzen, Abblasen oder Absaugen? In: Journal für Oberflächentechnik, 62 (12), S. 42 – 44 [abgerufen am: 22.01.2023], verfügbar unter: https://www.cleancontrolling.com/fileadmin/user_upload/Fachbeitrag_JOT_-_Spritzen__Abblasen_oder_Absaugen_-_Korrektur_CWO.pdf

Nettesheim, S. (2017): Entlacken und Reinigen von Oberflächen mit Plasma [online] [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: https://www.relyon-plasma.com/wp-content/uploads/2018/10/181025_Entlacken-und-Reinigen-von-Oberfl%C3%A4chen-mit-Plasma.pdf

Oberfläche-Online – Fachmagazin für industrielle Oberflächentechnik (2024): Lexikon der Oberflächentechnik [online] [abgerufen am: 30.04.2024], verfügbar unter: <https://www.oberflaechen-technik.net/themen/lexikon>

plasma technology GmbH (2024): Plasmareinigung [online] [abgerufen am: 25.02.2024], verfügbar unter: <https://www.plasmatechnology.de/plasmareinigung.html>

ReiTec Reinigungstechnik und -systeme GmbH (2023): Farben und Lackindustrie [online] [abgerufen am: 14.03.2024], verfügbar unter: <https://reitec-online.de/referenzen/lackindustrie/>

ReiTec Reinigungstechnik und -systeme GmbH (2024): Reinigungsverfahren [online] – REITEC Technologien [abgerufen am: 14.03.2024], verfügbar unter: <https://reitec-online.de/reinigungstechnik/reinigungstechnologie/reinigungsverfahren/>

RJL Micro & Analytic GmbH (2024): Was ist technische Sauberkeit? [online] – Grundlegendes zur Prüfung der Bauteilsauberkeit [abgerufen am: 11.06.2024], verfügbar unter: <https://www.rjl-microanalytic.de/restschmutzanalyse-technische-sauberkeit-vda-19-iso-16232/grundlagen-restschmutz-technische-sauberkeit/>

Rostkowski, S. und Beckmann, M. (2014): Energieeffizienz durch optimierte Reinigung [online]. In: Thomé-Kozmiensky, K.J. und Beckmann, M., Hg. Energie aus Abfall, TK Verlag, Neuruppin, S. 191 – 205 [abgerufen am: 23.02.2024], verfügbar unter: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/evt/ressourcen/dateien/Veroeffentlichungen/VWS-2014-01.pdf?lang=de>

Sandstrahlerei Willfried Bräuer (2024): Sandstrahl Lexikon [online] [abgerufen am: 12.06.2024], verfügbar unter: <https://www.sandstrahlerei-braeuer.de/sandstrahl-lexikon>

Santner, C. (2010): Entwicklung emissionsarmer Reinigungsprozesse für Werkstückoberflächen mit besonderer Berücksichtigung von Produktionsprozessen der Automobilzulieferindustrie, Grambach, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 54/2010 [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/fdz_pdf/endebericht_1054_eфор.pdf

Saxon, G. E. und Putman, R. E. (2003): The Practical Application and Innovation of Cleaning Technology for Heat Exchangers [online]. In: Watkinson, P.; Müller-Steinhagen, H. und Malayeri, M.R., Hg. Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, S. 294 – 301 [abgerufen am: 18.01.2023], verfügbar unter: <https://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1039&context=heatexchanger>

Schlauchservice Baumann GmbH (2024): Digitalisierung der Reinigung im Betrieb [online] [abgerufen am: 28.06.24], verfügbar unter: <https://schlauch-service.ch/technische-loesungen/>

Schlütersche Fachmedien GmbH (2019): Sauberkeit: Wie messen Sie filmische Verunreinigung? [online] – Spezifikationen zur technischen Sauberkeit sind inzwischen selbstverständlich. Dabei rücken immer häufiger filmische Rückstände in den Fokus. [abgerufen am: 02.10.2024], verfügbar unter: <https://www.nc-fertigung.de/sauberkeit-wie-messen-sie-filmische-verunreinigung>

Schöler, M.; Fuchs, T.; Helbig, M.; Augustin, W.; Scholl, S. und Majschak, J.-P. (2009): Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures [online]. In: Müller-Steinhagen, H.; Malayeri, M.R. und Watkinson, A.P., Hg. Proceedings of 8th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning, S. 455 – 463 [abgerufen am: 18.01.2023], verfügbar unter: https://heatexchanger-fouling.com/wp-content/uploads/2021/09/64_Schoeler_F.pdf

Schreier, J. (20.03.2014): Leipold verzichtet auf halogenierte Lösemittel bei der Teilereinigung [abgerufen am: 24.07.2023], verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/leipold-verzichtet-auf-halogenierte-loesemittel-bei-der-teilereinigung-a-438774/>

Schulz, D. (2022): Energieeffizienter reinigen [online] – Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu verringern - für bestehende und neue Anlagen [abgerufen am: 23.02.2024], verfügbar unter: <https://oberflaeche.de/wissen/themen/reinigen-vorbehandeln/energieeffizienter-reinigen>

Schulz, D. (2023): Sauberkeit für einen aussagekräftigen Durchblick [online] – Feinstreinigung optischer Bauteile für die Medizintechnik [abgerufen am: 23.02.2024], verfügbar unter: https://ecoclean-group.net/fileadmin/pdf/ECOCLEAN/Pressarticle/2023/11/Ecoclean_UCM_PR_Feinstreinigung_Optik_MedTech_DE_2023-03.pdf

Schulz, D. und Itasse, S. (2020): Automation und Industrie 4.0 verbessern Teilereinigung [online] [abgerufen am: 28.06.24], verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/automation-und-industrie-40-verbessern-teilereinigung-a-908416/>

Schwarz, W. und Leisewitz, A. (1999): Stand der Technik und Potentiale zur Senkung der VOC-Emissionen aus Anlagen zur Reinigung von Oberflächen, Frankfurt am Main [abgerufen am: 11.03.2024], verfügbar unter: <https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/voll-voc.pdf>

Scicchitano, M. A. (2008): Air-conditioning Equipment. In: Mobley, R.K.; Higgins, L.R. und Wikoff, D.J., Hg. Maintenance Engineering Handbook. 7th ed., McGraw-Hill, New York, 4.53-4.85.

SensoTech GmbH (2015): Konzentration und Verschmutzungsgrad kontinuierlich bestimmen. In: Journal für Oberflächentechnik, (6), S. 46 – 48 [abgerufen am: 27.02.2024], verfügbar unter: https://www.sensotech.com/fileadmin/sensotech/pdf-media-downloads/LSM243_00.pdf

Shrestha, G. M. und Niggemann, O. (2014): A Bayesian Predictive Assistance System for Resource Optimization - A Case Study in Industrial Cleaning Process [online]. In: Grau, A. und Martinez, H., Hg. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, S. 1 – 6 [abgerufen am: 18.01.2024], verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Ganesh-Shrestha-6/publication/265383011_A_Bayesian_Predictive_Assistance_System_for_Resource_Optimization_-_A_Case_Study_in_Industrial_Cleaning_Process/links/54cf4f360cf29ca810fddc89/A-Bayesian-Predictive-Assistance-System-for-Resource-Optimization-A-Case-Study-in-Industrial-Cleaning-Process.pdf

Sonnenberg, V. (2021): Automatische Reinigung von Werkstücken [abgerufen am: 24.07.2024], verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/automatische-reinigung-von-werkstuecken-a-1017059/>

Strobel, J. und Lerch, R. (2008): Experimentelle Untersuchungen zur Optimierung von Ultraschallreinigungsprozessen [online]. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hg. Fortschritte der Akustik - DAGA 2008. *34. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, Berlin, S. 453 – 454 [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/articles/003543.pdf

Strobel, J.; Bretz, N. und Lerch, R. (2006): Experimentelle Untersuchung zur Kavitation und Reinigungswirkung in der Ultraschallreinigung [online]. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hg. 32. Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA'06, Berlin, S. 367 – 368 [abgerufen am: 12.03.2024], verfügbar unter: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_1999-2008/data/articles/002555.pdf

Techpilot - DynamicMarkets GmbH (2022): Lexikon der Fertigungsindustrie [online] [abgerufen am: 12.06.2024], verfügbar unter: <https://www.techpilot.de/lexikon/>

Tennant GmbH & Co. KG (2024): Herausforderungen und Chancen für Reinigungsunternehmen [online] [abgerufen am: 19.06.2024], verfügbar unter: https://www.tennantco.com/de_de/ressourcen/ressourcen-center/whitepaper/reinigungsunternehmen-herausforderungen-und-chancen.html

Uhlmann, E.; Drieux, S. und Jaczkowski, R. (2017): CO₂-Reinigung vor dem Impulsmagnetischen Schweißen – Reinigung mittels CO₂-Schneestrahlen sowie Fügen durch Impulsmagnetisches Schweißen kombiniert. In: wt Werkstattstechnik online, 107 (7), S. 551 – 557.

Verband der Automobilindustrie e.V. (2004): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Prüfung der Technischen Sauberkeit. Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile, Oberursel.

Windisch, M. (2019): Optische Sauberheitskontrolle in der Industriellen Bauteilreinigung - Lösungsansätze für problematische Messaufgaben [online]. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik und Informationstechnische Gesellschaft, Hg. 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019, AMA Service, Wunstorf, S. 100 – 104 [abgerufen am: 27.02.2024], verfügbar unter: <https://www.ama-science.org/proceedings/download/ZmZ4AN==>

Wullstein, M. (2004): Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen. Dissertation, Dortmund [abgerufen am: 29.02.2024], verfügbar unter: <https://d-nb.info/1011532263/34>

Zachmann, T. (2024): Anwendungsschulung: Messtechnik zur Qualitätssicherung in der Bauteilreinigung [abgerufen am: 15.07.2024], verfügbar unter: https://www.sita-process.com/fileadmin/img/process/user/Seminare/Unterlagen_Mai_2022/SITA_Online-Seminar_Bauteilreinigung_Modul2_UEberwachen_der_Reinigungsbaeder.pdf

Zeiss, F. (2017): CIP-Prozesse – Automatisierte Reinigung vor Ort [online] [abgerufen am: 28.06.24], verfügbar unter: <https://befootec.de/cip-prozesse-automatisierte-reinigung-vor-ort/>

Zhou, Z.; Sun, W.; Wu, J.; Chen, H.; Zhang, F. und Wang, S. (2023): The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry. In: Processes, 11 (1445).

Zwinkau, R.; Schmied, A.; Habertzettl, S.; Lau, K.; Seiler, J. und Nerling, R. (2021): Markt- und Trendstudie zur Technischen Sauberkeit in der Behälter- und Verpackungslogistik 2021 – CEC-Arbeitskreis: Sauberkeitsgerechte Verpackung, Leonberg [abgerufen am: 22.01.2023], verfügbar unter: https://cec-leonberg.de/wp-content/uploads/2021/09/Studienbericht_Technische-Sauberkeit-in-der-Behaelter-und-Verpackungslogistik-2021.pdf

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)
Bülöwstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

