

Entwicklung emissionsarmer
Reinigungsprozesse für Werkstück-
oberflächen mit besonderer Berück-
sichtigung von Produktionsprozessen
der Automobilzulieferindustrie

C. Santner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

54/2010

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Entwicklung emissionsarmer Reinigungsprozesse für Werkstück- oberflächen mit besonderer Berück- sichtigung von Produktionsprozessen der Automobilzulieferindustrie

DI (FH) Christian Santner
ACstyria Autocluster Ges.m.b.H

Projektpartner

MAGNA Powertrain AG & Co KG
Sebring Technology GmbH
Georg Fischer GmbH & Co KG
MAP Pamminer GmbH
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
Technische Universität Graz

Grambach, Februar 2010

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	3
Kurzfassung.....	6
Abstract	7
1 Projektabriss	8
2 Einleitung.....	13
2.1 Allgemeine Einführung in die Thematik	13
2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema	17
2.3 Fokus/Schwerpunkte der Arbeit.....	18
2.4 Einpassung in der Programmlinie	19
2.5 Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichtes.....	20
3 Ziele des Projektes	21
4 Inhalte und Ergebnisse des Projektes	22
4.1 Verwendete Methoden und Daten	22
4.2 Beschreibung des Standes der Technik und Innovationsgehalt des Projektes	26
4.3 Beschreibung der Projektergebnisse	28
5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie.....	42
5.1 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung	42
5.2 Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt.....	43
5.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potentiale für die Projektergebnisse.....	43
6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen.....	44
7 Ausblick / Empfehlungen	46
8 Literatur-/ Abbildungs-/ Tabellenverzeichnis.....	47
8.1 Literaturverzeichnis.....	47
8.2 Abbildungsverzeichnis	59
8.3 Tabellenverzeichnis	60
9 Anhang	61
9.1 Nasschemische Reinigungsverfahren	61
9.1.1 Ultraschallreinigung.....	61
9.1.2 Druckumfluten	62
9.1.3 Tauchreinigung.....	62
9.1.4 Spritzreinigung	63

9.1.5	Trommelreinigung	64
9.1.6	Bürstenreinigung mit Reinigungsmittel	65
9.1.7	Abkochen	65
9.1.8	Dampfentfettung	65
9.2	Mechanische Reinigungsverfahren	66
9.2.1	Vibrationsreinigung	66
9.2.2	Bürsten	66
9.2.3	Schleudern	67
9.2.4	Abblasen	67
9.2.5	Gleitschleifen	67
9.3	Strahlverfahren	68
9.3.1	Druckluftstrahlen	68
9.3.2	Schleuderstrahlen	69
9.3.3	Nassstrahlen	69
9.3.4	CO ₂ Schnee Strahlen	71
9.3.5	CO ₂ Pellets Strahlen	71
9.4	Sonderverfahren der Bauteilereinigung	72
9.4.1	Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid (CO ₂)	72
9.4.2	Reinigen mit überkritischen CO ₂	72
9.4.3	UV-Licht Reinigung	73
9.4.4	Blitzlampenreinigung	73
9.4.5	Plasmareinigung	73
9.4.6	Elektro-Chemische Reinigung	74
9.4.7	Vakuumtölen	75
9.5	Flüssige Reiniger	75
9.5.1	Wässrige Reiniger	78
9.5.2	Organische Lösungsmittel	84
9.5.3	Wasser Kohlenwasserstoff Emulsionen	86
9.5.4	Pflanzenölbasierte Reiniger	87
9.5.5	Flüssiges CO ₂	88
9.6	Feststoff-Reiniger	89
9.6.1	Schleifkörper	89
9.6.2	Strahlreinigungsmittel	89
9.6.3	Reinigen mit Maisspindelgranulat	90

9.7	Technologien zur Waschbadaufbereitung / Störstoffentfernung	91
9.7.1	Filtration.....	92
9.7.2	Hydrozyklon.....	92
9.7.3	Fällung.....	92
9.7.4	Flockung.....	92
9.7.5	Flotation.....	93
9.7.6	Zentrifugen	94
9.7.7	Ionenaustausch-Verfahren	94
9.7.8	Schwerkraftverfahren	95
9.7.9	Absetzbecken	95
9.7.10	Absetzbecken mit Koaleszer	96
9.7.11	Überlaufrinnen.....	97
9.7.12	Skimmer	97
9.7.13	Demulgatoren.....	97
9.7.14	Demulgierende Reiniger.....	98
9.7.15	UV-Licht-Oxidation	99
9.7.16	Säurespaltung	99
9.7.17	Elektrokoagulation.....	100
9.7.18	Koalisierfilter	101
9.7.19	Membrankoaleszer.....	102
9.7.20	Adsorption	104
9.7.21	Erhöhung der Temperatur	104
9.7.22	Verdampfung.....	104
9.7.23	Biologische Aufbereitung.....	106
9.7.24	Druckgetriebene Membrantrennverfahren.....	108
9.8	Kontinuierliche Überwachung der Reinigungsbäder und -leistung	112
9.8.1	Überwachung der Reinigerkonzentration	112
9.8.2	Überwachung der Badqualität	114
9.8.3	Überwachung der Oberflächen- / Produktreinheit	115

KURZFASSUNG

Bei der Herstellung und Bearbeitung von Metallbauteilen verlangen viele Fertigungsschritte eine Abreinigung der produzierten Werkstücke von anhaftenden Spänen und Prozesshilfsmitteln, um in nachfolgenden Prozessschritten eine optimale Produktqualität erzielen zu können. Diese Reinigungsprozesse sind vielfach sehr wasser-, chemikalien- und energieintensiv und eine Klassifizierung der Verschmutzung oder der zu erreichenden Werkstückreinheit ist meist nicht vorgesehen. Vielmehr wird zum Zweck der Erreichung einer optimalen Produktqualität die erfolgreiche Durchführung in nachfolgenden Prozessschritten geprüft, auf Basis derer sich die Anforderungen an den Reinigungsprozess richten. Diese Reinigungsprozesse sind üblicherweise nicht das Kerngeschäft von Produktionsbetrieben, es besteht dafür meist kein spezifisches Wissen und aufgrund der Einordnung als Randprozess in der Fertigungskette keine eindeutige Zuordnung personeller Verantwortung.

Eine Optimierung bestehender Waschanlagen ist daher in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht vielfach sinnvoll und notwendig, um stoffliche Emissionen und damit einhergehende umweltrelevante Kosten im Unternehmen zu reduzieren. Eine ganzheitliche Betrachtung von Waschprozessen verlangt dabei auch eine Optimierung vorgelagerter Prozesse, um den Eintrag dort eingesetzter Prozesshilfsmittel in den Reinigungsprozess zu reduzieren. Die Auswahl geeigneter Reinigungssysteme und Reinigungschemikalien steht also in direktem Zusammenhang mit der Art an Prozesshilfsmitteln, die in vorgelagerten Fertigungsschritten zur Prozessunterstützung eingesetzt werden. Die Hauptstoßrichtung des Projektes EFOR bestand daher in der Erbringung des Nachweises, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese vom Produktionsprozess nicht losgelöst, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Diesbezüglich wurden mögliche Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Rahmen von Laborversuchen und Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht.

Neben Ölabscheidersystemen wurde im speziellen die praxisnahe Einsatzfähigkeit der Membrantechnologie zur effektiven Entfernung von Störstoffen aus Reinigungsbädern untersucht. Im Rahmen von Ultrafiltrationsversuchen zeigte sich dabei die grundsätzliche Eignung der Membrantechnologie zur effektiven Abtrennung von Ölen und Fetten bei gleichzeitiger Rückgewinnung von Reinigungschemikalien. Für einen wirtschaftlichen Einsatz ist wie bei allen anderen Präventivmaßnahmen individuell auf die jeweiligen betriebs- prozess- und produktionsspezifischen Gegebenheiten einzugehen, um durch eine gesamtheitliche Betrachtungsweise das optimale Konzept zur effektiven und effizienten Betriebsführung von Teilwaschanlagen erarbeiten zu können.

ABSTRACT

In the metal processing industry many manufacturing processes require a cleaning step within the process chain for degreasing and cleaning metal surfaces to gain an optimal product quality in following production steps. In many cases, these cleaning processes need a high amount of water, chemicals and energy and in the majority of the cases a classification of the necessary surface cleanliness isn't given. In fact, the operating requirements on the cleaning process are defined by the successful realisation of the following process steps, these cleaning steps are not the core business of manufacturing companies and due to the classification as marginal process step, the specific knowledge on cleaning processes can often be seen as limited within individual companies.

Thereby, in many cases a high potential to enhance the operating performance and to reduce the specific cost on these processes is given. Furthermore, these cleaning processes become more and more important as independent process step within the value added chain, as increasing quality standards require a defined cleanliness of component surfaces. In order to reduce the input of process utilities and contraries into the cleaning process, an integrated approach also requires an optimisation of previous manufacturing steps and a best possible adjustment when selecting cleaning technologies and chemical systems.

Therefore, the project aimed at the economical and ecological optimisation of cleaning processes by following an integrated approach, where the cleaning step can be seen as integral part within the process chain. Referring to this, possible optimisation measures were evaluated and potential treatment technologies to purify the washing medium were analysed in the form of laboratory experiments and experiments under real operating conditions.

Beside commonly used oil separators the practical application of membrane filtration technologies for the effective removal of pollutants to enhance the lifetime of the washings baths were evaluated. Therefore, in the course of experiments with ultra filtration membranes the effective removal of oil and grease with the simultaneous recovery of surfactants could be demonstrated. However, for an economical integration in existing cleaning processes the technology of ultra filtration as well as oil separations or any other kind of treatment technology has always be adapted to the specific process and production conditions. Therefore, in consideration of the mentioned integrated approach the operation of cleaning processes can be changed to an economical and ecological efficient way.

1 Projektabriss

Bei der Herstellung und Bearbeitung von Metallbauteilen verlangen viele Fertigungsschritte eine Abreinigung der produzierten Werkstücke von anhaftenden Spänen und Prozesshilfsmitteln, um im nachfolgenden Prozessschritt eine optimale Produktqualität erzielen zu können. Diese Reinigungsprozesse sind vielfach sehr wasser-, chemikalien- und energieintensiv und eine Klassifizierung der Verschmutzung oder der zu erreichenden Werkstückreinheit ist meist nicht vorgesehen. Vielmehr wird zum Zweck der Erreichung einer optimalen Produktqualität die erfolgreiche Durchführung in nachfolgenden Prozessschritten geprüft, auf Basis derer sich die Anforderungen an den Reinigungsprozess richten. Diese Reinigungsprozesse sind üblicherweise nicht das Kerngeschäft von Produktionsbetrieben, es besteht dafür meist kein spezifisches Wissen und aufgrund der Einordnung als Randprozess in der Fertigungskette keine eindeutige Zuordnung personeller Verantwortung. Eine Optimierung bestehender Waschanlagen ist daher in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht vielfach sinnvoll und notwendig, um stoffliche Emissionen und damit einhergehende umweltrelevante Kosten im Unternehmen zu reduzieren. Eine ganzheitliche Betrachtung von Waschprozessen verlangt dabei auch eine Optimierung vorgelagerter Prozesse, um den Eintrag dort eingesetzter Prozesshilfsmittel in den Reinigungsprozess zu reduzieren. Die Auswahl geeigneter Reinigungssysteme und Reinigungschemikalien steht also in direktem Zusammenhang mit den Prozesshilfsmitteln, die in vorgelagerten Fertigungsschritten zur Prozessunterstützung eingesetzt werden. Die Hauptaufgabe dieser Prozesshilfsmittel besteht in der Regel im Kühlen, Schmieren und dem Abtransport von Spänen, wobei zusätzliche Anforderungen wie Korrosionsschutz, Stabilität und Schaumfreiheit den Zusatz verschiedenster Additive (Zusatzstoffe) erfordern. Diese können durch Einschleppung in das Reinigungssystem mit diesem in Wechselwirkung treten und die Spaltung bzw. Demulgierung des Reinigungsbades erschweren. Die bearbeitenden Werkstücke gelangen dabei mit den Restgehalten an Kühl- und Schmierstoffen über das Werkstück in das Reinigungsbad und werden dort als Schadstoffe aufkonzentriert. Hier wird offensichtlich, wie bedeutend die Abstimmung des gewählten Reinigungssystems (Reinigungsverfahren, Reinigungschemikalien, Aufbereitungsverfahren) mit den eingesetzten Prozesshilfsmitteln (Fetten, Ölen und Additiven) ist.

Das Projektziel bestand daher in der Optimierung von Reinigungsprozessen durch Erarbeitung ganzheitlicher Lösungskonzepte. Dadurch sollte der Nachweis erbracht werden, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht vom Produktionsprozess losgelöst, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Grundsätzlich ist der Prozess der Werkstückreinigung wesentlich für die Qualität des Endproduktes verantwortlich. Die Produktqualität und der jeweilige Reinigungsprozess definieren demnach die Anforderungen an die Qualität des Reinigungsmediums, wobei sich diese je nach Werkstoff, Werkstückform, Fertigungsschritt und der eingetragenen Prozesshilfsmittel / Art der Oberflächenverschmutzung grundlegend unterscheiden können. Reinigungssysteme benötigen für eine praxisnahe Optimierung daher den Einsatz innovativer Reinigungsverfahren und -konzepte, um den

Reinigungsprozess optimal auf die Reinigungsanforderungen abstimmen zu können. Diesbezüglich wurden im Zuge der Projektbearbeitung unter Berücksichtigung der nachstehenden Punkte mögliche Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Rahmen von Laborversuchen bzw. Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Diese Konzepte zur Verfahrensumstellung sollten zu Projektende eine direkte, wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung in einem Demonstrationsprojekt ermöglichen, wobei im dargestellten Projekt bereits innerhalb der Projektbearbeitung Teilewaschanlagen optimiert und die Standzeiten von Waschbädern um ein vielfaches erhöht wurden.

1. Analyse von Reinigungsprozessen im Bereich der Automobilzulieferindustrie
2. Evaluierung von Methoden zur Charakterisierung von Reinigungsprozessen
3. Screening möglicher Verfahren und Technologien zur Aufbereitung verbrauchter Waschmedien und Durchführung von Labor- und Technikumsversuchen
4. Erarbeitung von Optimierungskonzepten und Durchführung von Versuchen unter realen Betriebsbedingungen
5. Ökonomische und ökologische Beurteilung der adaptierten Reinigungsprozesse

Die Arbeiten im Rahmen der Analyse von Reinigungsprozessen umfassenden dabei die Evaluierung möglicher Technologien zur effektiven Störstoffentfernung im Bereich der Waschbadaufbereitung und zur systematischen Pflege von Kühlschmieremulsionen.

Da für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken die Überwachung der Reinigungsbäder und Reinigungsleistung einen entscheidenden Beitrag liefert, wurden im Rahmen der Arbeiten des Weiteren Methoden zur Charakterisierung von Reinigungsprozessen evaluiert. Durch die Bestimmung der Badbelastung, der noch vorhandenen Reinigerkonzentration und der daraus erzielbaren Oberflächenreinheit kann durch Einsatz von Inline-Messsystemen der optimale Zeitpunkt für den Badwechsel ermittelt und damit der Ressourcenbedarf / -einsatz auf ein Optimum reduziert werden.

Die praktischen Arbeiten im Labor und Technikumsmaßstab bzw. in den Betrieben der Wirtschaftspartner umfassten die Untersuchung von Waschprozessen und alle damit in direkten Zusammenhang stehenden Prozessen und Ressourcen. Anhand detaillierter Prozessanalysen wurden einerseits bestehende Technologien zur Aufbereitung von Reinigungsbädern analysiert. Andererseits wurden durch Labor-, Technikums- und Pilotversuchen die Voraussetzungen zur Adaptierung bestehender Reinigungs- und Aufbereitungskonzepte geschaffen.

Für die Charakterisierung der eingesetzten Prozesschemikalien, der Reinigungsleistung und der Demulgierfähigkeit der Tenside wurden physikalisch-chemische, kolloidchemische und tensiometrische Methoden herangezogen. Zur Erhöhung der Badstandzeiten wurden mechanische und chemisch-physikalische Aufbereitungsverfahren erprobt und in zwei Anwendungsfällen direkt zur Umsetzung gebracht.

Zusammenfassend führten die Arbeiten am Projekt EFOR dabei insbesondere zu nachstehenden Ergebnissen:

- Wirksamer als jede Technologie zur effektiven Abtrennung von Störstoffen aus nasschemischen Reinigungsprozessen ist die Vermeidung des Störstoffeintrages. D.h. bei der Optimierung von Reinigungsprozessen müssen auch vorgelagerte Prozesse innerhalb der Fertigungskette betrachtet werden, um ein optimiertes Zusammenspiel zwischen den eingesetzten Prozesshilfsmitteln, der Prozessführung, der eingesetzten Reinigungstechnologie und der im System integrierten Präventivmaßnahmen zur Störstoffentfernung gewährleisten zu können.
- Ölabscheidersysteme stellen eine kostengünstige Technologie zur Abtrennung von freien Ölen dar und zeichnen sich durch einen geringen anlagentechnischen Aufwand aus. Die Funktionalität von Ölabscheidersystemen wird dabei im Wesentlichen von den herrschenden Wechselbeziehungen zwischen Ölen/Fetten und den demulgierenden Tensiden bestimmt. Nichtionische Tenside besitzen dabei ein höheres Demulgiervermögen als anionische Tenside, wodurch die Entmischung von O/W Emulsionen durch Zugabe reiner Tensidkomponenten (z.B. nichtionisches Spritztensid) erhöht werden kann. Anlagenseitig kann die Abtrennleistung durch Unterstützung des Zusammenfließens kleinerer Öltröpfchen zu größeren Öltröpfchen (Koaleszenz) verbessert werden. Dabei wird der Weg des Aufsteigens der Öltröpfchen durch zusätzliche Einbauten (hydrophobe Platten, Flächen, etc.) vergrößert.
- Die Membranfiltration bietet die Möglichkeit der selektiven Rückgewinnung von Reinigungschemikalien bei gleichzeitiger Abtrennung von Störstoffen. Entscheidend für den effektiven Einsatz der Membranfiltration (Ultrafiltration) ist neben der optimalen Abstimmung aller anlagenspezifischen Faktoren (Anlagengröße, abzutrennende Störstoffe, Membrantyp, etc.) auch die Abstimmung mit dem eingesetzten Reinigersystem. Zweikomponentenreinigersysteme ermöglichen dabei die getrennte Zudosierung von Tensid- und Builderkomponenten, wodurch eine gezielte Zugabe verbrauchter Reinigerbestandteile möglich ist. Dadurch kann die Anreicherung von Buildersubstanzen (Aufsätzung) verhindert und eine den Reinigungsanforderungen gerechte Chemikalienzudosierung durchgeführt werden. Die Aufbereitung von Waschbädern mittels Membranfiltration ist bei Verwendung von Einkomponentenreinigersystemen nur bedingt möglich, da die Nachdosierung von Vollprodukten zu einer Anreicherung von Buildersubstanzen und zu einem irreversiblen Scaling (Salzablagerung) der eingesetzten Membran führen kann.
- Maisspindelgranulat eignet sich als Feststoffreiniger zur Abreinigung unpolarer Verunreinigungen auf Werkstückoberflächen sofern keine hohen Oberflächenqualitäten gefordert sind. Die wirtschaftlichen Vorteile gegenüber nasschemischen Reinigungsverfahren liegen in der Reduktion der ansonsten notwendigen Betriebsmittel VE-Wasser, Reinigungschemikalien, Energie und der Substitution anfallender und aufzubereitender Abwässer. Bei Teilen mit hoher Oberflächenhärte kann eine negative Beeinflussung der

Oberfläche durch Materialabtrag weitestgehend ausgeschlossen werden. Wie beim Einsatz nasschemischer Reinigungsverfahren muss allerdings auch bei der Trockenreinigung mittels Maisspindelgranulat individuell auf die jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen vor Einsatz des Verfahrens im großtechnischen Maßstab eingegangen werden.

- Demulgatoren und Polyelektrolyte erhöhen das Entmischungsverhalten stabiler Emulsionen und können so zu einer raschen Ölabtrennung beitragen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang allerdings die optimale Abstimmung der Demulgatoren / Polyelektrolyte auf das eingesetzte Reinigungssystem sowie die eingetragenen Fette und Öle. Eine Überdosierung kann sich negativ auf die Reinigungsleistung auswirken und zu einem verstärkten Austrag von Reinigungschemikalien führen.
- Für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken liefert die Überwachung der Reinigungsbäder einen entscheidenden Beitrag. Durch die Bestimmung der Badbelastung und der noch vorhandenen Reinigerkonzentration kann der optimale Zeitpunkt für den Badwechsel ermittelt und Reinigerkomponenten entsprechend des tatsächlichen Verbrauchs zudosiert werden. Für die Kontrolle der Reinigungsleistung stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung, wobei durch Einsatz von Inline-Messsystemen konstante Reinigungsqualitäten und Oberflächenreinheiten gewährleistet werden können.

Im Rahmen des Projektes EFOR wurden also eine Vielzahl von Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Zuge von Laborversuchen und Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Die primäre Zielsetzung bestand dabei in der Erbringung des Nachweises, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht losgelöst vom Produktionsprozess, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Neben Ölabscheidersystemen wurde dafür im speziellen die praxisnahe Einsatzfähigkeit der Ultrafiltration zur effektiven Entfernung von Störstoffen aus Reinigungsbädern untersucht. Im Rahmen von Labor- und großtechnischen Versuchen konnte die grundsätzliche Eignung der Ultrafiltration zur effektiven Abtrennung von Störstoffen bei gleichzeitiger Rückgewinnung von Reinigungschemikalien nachgewiesen werden. Ein wirtschaftlicher Einsatz von dezentralen Anlagen ist allerdings nur bei entsprechender Anlagengröße, bei entsprechendem Werkstückdurchsatz und optimaler Wartung vorstellbar. Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz der Membrantechnologie ist neben der Abstimmung der Anlage auf die abzuscheidenden Störstoffe und die Abstimmung zwischen Reinigungsanlage und Reinigungschemikalien daher auch eine eindeutige Zuordnung personeller Verantwortung für den Bereich der Anlagenwartung. In Betrieben mit einer großen Anzahl von Teilewaschanlagen könnte sich die diskontinuierliche Aufbereitung verbrauchter Waschmedien in einer zentralen Anlage als vorteilhaft und kosteneffizienter erweisen. Die Aufbereitung und Wartung der Anlage könnte zentral durchgeführt und der anlagentechnische und personelle Aufwand auf ein Minimum reduziert werden. Grundvoraussetzung für einen effizienten Einsatz ist allerdings ein optimiertes Zusammenspiel zwischen eingesetzter Reinigungschemie, der Maßnahmen zur Überwachung der

Reinigungsbäder und –leistung und der ordnungsgemäßen Wartung und Pflege der anlagenseitig integrierten Technologien zur Störstoffentfernung. Durch Kombination dieser meist als Ölabscheidersysteme integrierten Präventivmaßnahmen mit einer zentralen Membranfiltrationseinheit könnte in weiterer Folge eine weitgehende Störstoffentfernung unter Einhaltung wirtschaftlicher Vorgaben (Amortisationszeit) realisiert werden.

Wie sich bei der Projektdurchführung gezeigt hat, nimmt die Prozessüberwachung eine zentrale Rolle bei der Erhöhung der Ressourceneffizienz von Waschprozessen ein. Durch die kontinuierliche Überwachung der Badqualität und der erzielbaren Reinigungsleistung können Reinigungskemikalien gezielt nachdosiert und der optimale Zeitpunkt zum Verwerfen der Waschwässer ermittelt werden.

Um die Wirtschaftlichkeit von Reinigungsprozessen zu erhöhen ist daher eine gesamtheitliche Betrachtung von Reinigungsprozessen unumgänglich, wobei bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen individuell auf die jeweiligen betriebs-, prozess- und produktionsspezifischen Gegebenheiten einzugehen ist.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung in die Thematik

Bei der Herstellung und Bearbeitung von Metallbauteilen verlangen viele Fertigungsschritte eine Abreinigung der produzierten Werkstücke von anhaftenden Spänen und Prozesshilfsmitteln, um im nachfolgenden Prozessschritt eine optimale Produktqualität erzielen zu können. Diese Reinigungsprozesse sind vielfach sehr wasser-, chemikalien- und energieintensiv und eine Klassifizierung der Verschmutzung oder der zu erreichenden Werkstückreinheit ist meist nicht vorgesehen. Vielmehr wird zum Zweck der Erreichung einer optimalen Produktqualität die erfolgreiche Durchführung in nachfolgenden Prozessschritten geprüft, auf Basis derer sich die Anforderungen an den Reinigungsprozess richten. Diese Reinigungsprozesse sind üblicherweise nicht das Kerngeschäft von Produktionsbetrieben, es besteht dafür meist kein spezifisches Wissen und aufgrund der Einordnung als Randprozess in der Fertigungskette keine eindeutige Zuordnung personeller Verantwortung. Eine Optimierung bestehender Waschanlagen ist daher in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht vielfach sinnvoll und notwendig, um stoffliche Emissionen und damit einhergehende umweltrelevante Kosten zu reduzieren bzw. um die Wertschöpfung der eingesetzten Hilfs- und Betriebsstoffe im Unternehmen zu erhöhen. Eine ganzheitliche Betrachtung von Waschprozessen verlangt dabei auch eine Optimierung vorgelagerter Prozesse, um den Eintrag dort eingesetzter Prozesshilfsmittel in den Reinigungsprozess zu reduzieren. Eine Optimierung dieser meist mechanischen Fertigungsprozesse kann zusätzlich zu einer Reduktion des Abfallaufkommens führen, da durch gezielte Präventivmaßnahmen eine Erhöhung der Standzeiten notwendiger Prozesshilfsmittel erreicht werden kann.

Die Auswahl geeigneter Reinigungssysteme steht also in direktem Zusammenhang mit den Prozesshilfsmitteln, die in vorgelagerten, meist mechanischen Fertigungsprozessen eingesetzt werden. Die Hauptaufgabe dieser Prozesshilfsmittel besteht in der Regel im Kühlen, Schmieren und dem Abtransport der Späne. Bei wassermischbaren Systemen wird die Kühlwirkung vom Wasser bestimmt, bei nicht mischbaren Systemen ist die Kühlleistung von der Viskosität des Produktes abhängig. Die Schmierwirkung ist andererseits von der Art und Aufbau des Produktes abhängig. Die Schmierleistung des Produktes wird durch chemische Zusätze sog. Antiwear (AW)- oder Extreme Pressure (EP) Additiven erhöht. Für den Abtransport der Späne von der Metalloberfläche sind indessen die Viskosität und die grenzflächenaktiven Inhaltsstoffe des Produktes verantwortlich.

Durch die zusätzlichen Anforderungen an die eingesetzten Kühl- und Schmierstoffe wie Korrosionsschutz, Stabilität und Schaumfreiheit beinhalten diese synthetischen Produkte neben Fetten und Ölen eine Vielzahl von verschiedenen Zusatzstoffen (Additiven), die mit den Reinigungssystemen in weiterer Folge in Wechselwirkung treten und eine Spaltung des Reinigungsbades erschweren können. Die bearbeitenden Werkstücke gelangen mit den

Restgehalten an Kühl- und Schmierstoffen über das Werkstück in das Reinigungsbad und werden dort als Schadstoffe aufkonzentriert. Hier wird offensichtlich, wie bedeutend die Abstimmung des gewählten Reinigungssystems mit den eingesetzten Prozesshilfsmitteln (Fetten, Ölen und Additiven) ist.

Moderne Reinigungssysteme arbeiten mit Tensid-Systemen, die nur schwach emulgieren und dadurch die Möglichkeit schaffen, die Bademulsion ohne weitere chemische Zusätze wieder zu spalten und zu recyceln. Durch Einsatz dieser demulgierenden Tensid-Systeme können als Standzeitverlängerung der Reinigungsbäder mechanische Verfahren herangezogen werden, wie beispielsweise Schwerkraftölabscheider, Separator, Ultrafiltration oder Mikrofiltration. Voraussetzung für diese Behandlungsverfahren ist, dass sich die Öle selbständig von der wässrigen Phase trennen. Liegt eine stabile O/W Emulsion vor, erfolgt die Phasentrennung erst nach Aufheben der Emulsionsstabilität. Für eine Reduktion der Stabilität mit anschließender Koaleszenz der Öltröpfchen ist dann eine chemische Spaltung erforderlich (siehe Aufbereitungsverfahren im Anhang).

Inhaltsstoffe der Reinigungssysteme

Wässrige Reiniger enthalten Builder, Additive und Tenside und werden nach dem pH-Wert des Reinigermediums eingeteilt:

- saure Reiniger pH = 1,5 bis 6
- Neutralreiniger pH = 7 bis 10
- alkalische Reiniger pH > 11

Auf Grund der Eigenschaften der nichtionischen Tenside, die in der Nähe ihres Trübungspunktes ein geringes Schaumvermögen bei maximaler Reinigungswirkung besitzen, unempfindlich gegenüber Salzen sind und in einem wesentlich geringeren Umfang bei Ultrafiltration in das Retentat übergehen, werden heute sogenannte Neutralreiniger zur industriellen Reinigung von metallischen Bauteilen verwendet.

Als Builder kommen Salze (Phosphate, Silikate, Carbonate, Borate) sowie Alkalien oder Säuren in Betracht. Builder werden zur Wasserenthärtung eingesetzt und besitzen ein gutes Schmutztragevermögen von Metallabrieben. Durch die effektive Entfernung von Restverunreinigungen an Metallabrieb werden als Builderkomponente häufig Phosphate eingesetzt. Alkalien erzeugen einen hohen pH-Wert und eine gute Leitfähigkeit, so dass Fette leicht verseift und emulgiert werden können. Mineralöle lassen sich durch ihren unpolaren Charakter jedoch nicht verseifen und können somit durch die Alkalität nicht entfernt werden.

Additive können Komplexbildner, Korrosionsschutzmittel, Antischaummittel und Lösevermittler sein.

Eigenschaften der Tenside

Tenside sind länger-kettige Moleküle und werden in kationische, anionische und nichtionische Tenside eingeteilt. Sie haben die Aufgabe, Fette und Öle von der Oberfläche zu lösen und danach in der Reinigungslösung zu emulgieren, um ein Aufziehen auf das gereinigte Werkstück zu verhindern. Aufgrund der Struktur der Moleküle besitzen Tenside besondere Eigenschaften. Dazu zählen:

- Änderung von Oberflächeneigenschaften
- Mizellbildung
- Oberflächenaggregatbildung

Zur Beschreibung dieser Eigenschaften gibt es eine Reihe tensidspezifischer Messgrößen, die im folgenden Kapitel ebenfalls erläutert werden. Hervorzuheben sind dabei:

- Kritische Mizellbildungskonzentration; CMC
- hydrophil-lipophiles Gleichgewicht; HLB und
- Trübungspunkt (speziell nichtionische Tenside)

Tenside bestehen aus einem hydrophilen und hydrophoben Teil und besitzen die Eigenschaft die Oberflächenspannung einer Lösung herabzusetzen. Wird ein Tensid in Wasser gegeben, dann reichert es sich zunächst an der Grenzoberfläche an; der hydrophobe Teil ragt aus der Oberfläche heraus, der hydrophile Teil weist in die Lösung. Erst wenn an der Grenzfläche kein Raum für weitere Tensidmoleküle vorhanden ist, beginnen die Moleküle im Inneren der Flüssigkeit Agglomerate zu bilden, die als „Mizellen“ bezeichnet werden. Die Tensidkonzentration, bei der diese Mizellbildung einsetzt, bezeichnet man als Kritische Mizellbildungskonzentration (CMC). Ein wichtiges Maß für die Charakterisierung von Tensiden stellt die Kritische Mizellbildungskonzentration (Critical Micelle Formation Concentration; CMC) dar. Die Waschwirkung von Tensiden beruht darauf, dass hydrophobe Stoffe wie Fette und Öle in die Mizellen eingelagert werden können. Übersteigt die Tensidkonzentration die CMC-Grenze, bleibt die Oberflächenspannung der Lösung unverändert und die Lösung setzt sich nunmehr aus einer nahezu konstanten Konzentration von Tensidmonomeren und einer weiter steigenden Konzentration von Mizellen zusammen. Die Tenside besitzen ihre optimale Wirkungsweise nach Überschreiten der Kritischen Mizellbildungskonzentration. Der Vorgang kann wie folgt beschrieben werden:

- Benetzung und Adsorption mit dem hydrophoben Teil an der Oberfläche der Werkstücke und an den Fettpartikeln
- Bildung von Mizellen nach Erreichen der Kritischen Mizellbildungskonzentration (die hydrophoben Enden schließen die lipophilen Partikeln ein)
- Entfernung der emulgierten Fettpartikeln mit dem Waschwasser.

Die Kritische Mizellbildungskonzentration (CMC) von Tensiden ist für die Reinigungsleistung der wichtigste beeinflussende Faktor. Die Builder senken die Kritische Mizellbildungskonzentration, folglich werden die Adsorptions- und Benetzungseigenschaften beeinflusst sowie die Emulgiereigenschaften, Suspensionseigenschaften und die elektrostatischen Kräfte zwischen den

Fetten und Ölen und der Werkstoffoberfläche. Viele Reinigungssysteme beruhen durch diese Tenseideigenschaften auf Messung der Oberflächenspannung. Bei diesen Messsystemen muss jedoch auch das eingetragene Öl berücksichtigt werden. Einige Ölsorten wirken nach der Verseifung tensidisch und setzen ebenfalls die Oberflächenspannung herab. Ein an ein Öltröpfchen nicht gebundenes Öl bewirkt keine Reduktion der Oberflächenspannung.

Zur Beschreibung von Moleküleigenschaften vorwiegend nichtionischer Tenside dient das hydrophil-lipophile Gleichgewicht (hydrophilic-lipophilic balance; HLB) des Moleküls. Mit der Bestimmung des Molmassenverhältnisses der hydrophilen und der hydrophoben Molekülteile kann das Tensid hinsichtlich der emulgierenden Eigenschaft in Tensidklassen eingeteilt werden. So besitzt ein Tensid mit einem kleinen HLB-Wert gute Fett lösende Eigenschaften und bildet W/O Emulsionen aus. Ein Tensid mit einem großen HLB-Wert zeigt eine gute Benetzung von hydrophilen Oberflächen und bewirkt OW Emulsionen.

Ein weiteres Merkmal nichtionischer Tenside ist der Trübungspunkt. Das ist die Temperatur, bei der die Lösung eines nichtionischen Tensids der Konzentration von 10 [g/l] trüb wird. Dabei kommt es zu einer teilweisen Entmischung von Tensid und Wasser und es bildet sich eine Wasserphase mit geringem Tensidanteil und eine tensidreiche Phase [Wendler, 2003]. Gemessen wird der Trübungspunkt in Wasser, 1 [%] NaCl-Lösung oder 25 [%] Butyldiglykollösung. Je höher der HLB Wert des Tensids, desto höher ist auch die Temperatur des Trübungspunktes.

Emulgier- und Demulgierverhalten der Tenside

Reinigungsanlagen können abwasserfrei arbeiten, wenn die Wasch- und Spülflüssigkeiten über Schwerkraftölabscheider und die emulgierten Öle über Ultrafiltration geführt werden. Wichtig ist der Einsatz von demulgierenden Reinigern, bei denen die waschaktiven Substanzen die Membran passieren kann. Anionische Tenside emulgieren Öle und Fette stark und verhindern die Koaleszenz von Öltröpfchen. Kationische Tenside besitzen eine starke Schaumneigung und ziehen leicht auf feste Oberflächen auf, wodurch eine nachfolgende Oberflächenbehandlung gestört wird. Nichtionische Tenside haben eine hohe Reinigungswirkung und eine geringe Neigung zum Einemulgieren. Der hydrophile Teil der nichtionischen Tenside besteht aus Polyethylenglykol- oder Polypropylenglykolgruppen und der hydrophobe Teil aus Fettalkoholen oder Alkylphenolen. Der Tensidcharakter hängt vom Verhältnis der Molekülteile zueinander ab. Tenside, die emulgieren, waschen und demulgieren sollen, benötigen eine Kombination der einzelnen Tensidmonomere. Beispielsweise haben bei den Nonylphenolen die Additionsprodukte mit 5 -6 Molen Ethylenoxid (EO) eine gute Emulgiereigenschaft, Additionsprodukte mit 8-12 Molen EO sind Netz- und Waschmittel und die Additionsprodukte mit 12 – 15 Molen EO dienen als Dispergiermittel und Egalisiermittel.

Stabilität von Emulsionen

Bei der Stabilität einer Emulsion unterscheidet man zwischen Aufrahmen, Koagulation und Koaleszenz. Ein Aufrahmen oder eine Sedimentation erfolgt durch Dichteunterschiede und ist nicht unbedingt mit einer Aggregation verbunden. Das Aufrahmen wird somit nicht als Instabilität bezeichnet, weil die Öltröpfchen sich im Allgemeinen wieder redispersieren lassen. Eine Flockung

oder Koagulation von Öltröpfchen ist dann instabil, wenn die Emulsion sich nicht wieder redispersieren lässt. Behalten die Tröpfchen ihren Charakter bei, ist die Emulsion nicht zerstört. Erst das Zusammenfließen der Öltröpfchen führt zur Brechung der Emulsion und zur Phasentrennung und wird als Koaleszenz bezeichnet. Daher wird die Geschwindigkeit der Koaleszenz der Tröpfchen als Maß für die Stabilität der Emulsion herangezogen. Die Koaleszenz hängt somit von geschwindigkeitsbestimmenden Parametern wie folgt ab:

- Elektrische sterische Barrieren
- Temperatur
- Viskosität
- Tröpfchengrößenverteilung

Beispielsweise vergrößern anionische Tenside durch die Adsorption der langkettigen Anionen an den Öltröpfchen das negative elektrische Grenzflächenpotential. Dieses Potentialmaximum muss vor der Koaleszenz von Öltröpfchen wieder überschritten werden. Die elektrischen Ladungen der Tröpfchen wirken als Barriere gegen die Koaleszenz. Die Koaleszenzgeschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu. Damit nimmt die Stabilität ab. Wenn die Temperatur erhöht wird, nimmt die Hydratation der hydrophilen Gruppen der Tenside ab. Das Tensid wird hydrophober und der HLB-Wert nimmt ab. Eine höhere Viskosität hat einen stabilisierenden Einfluss auf die O/W Emulsion, da die Bewegung der Tröpfchen (Diffusionsgeschwindigkeit) und somit die Möglichkeit einer Koaleszenz erschwert wird.

Eine Emulsion ist umso stabiler, je enger die Größenverteilung der Tropfen ist. Größere Tropfen sind jedoch thermodynamisch stabiler als kleine, somit wachsen die Tropfen solange bis die Emulsion bricht.

2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Nachfolgend finden sich themenrelevante Projekte bzw. Vorhaben zum Thema des Projektes EFOR – Emissionsarme Oberflächenreinigung

- Schiwa – Schließung industrieller Wasserkreisläufe: In dieser Studie werden grundsätzliche Ansätze zur Verminderung des Wasserbedarfs von Produktionsprozessen auf der Ebene einzelner Operationen für integrierte Produktionsanlagen und für spezifische Sektoren beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Branchen mit hohen Wasserverbräuchen. Die analysierten Beispiele und Entwicklungen zeigen, dass in den letzten Jahren in vielen Fällen eine deutliche Erhöhung der Effizienz der Wassernutzung erzielt werden konnte. Im Allgemeinen betragen die Einsparungen bis zu 50 [%], in Einzelfällen mehr. SCHIWA bezieht sich auf eine Auswahl von wasserintensiven Prozessen aus verschiedenen Industriesparten, für die beispielhaft Technologien nach dem neuesten Stand der Technik ausgewählt wurden, um Wasserkreisläufe so weit wie möglich zu schließen. Die prinzipielle Vorgehensweise wurde im Projekt EFOR beibehalten, wobei durch die Betrachtung der Teilereinigung als Teil der Fertigungskette die Lösungsansätze wesentlich zielgerichteter betrachtet wurden.

- ZERMEG I & II – Zero Emissions Retrofitting Method for the Galvanizing Industry: Im Rahmen der FdZ Projekte ZERMEG wurde ein methodischer Ansatz zur Optimierung bestehender galvanischer Anlagen in Richtung einer emissions- und abwasserfreien Betriebes erarbeitet. Im Zuge von Fallstudien wurden Lösungsansätze zur Reduktion von Ausschleppungen aus Prozessbädern, zur Verbesserung der Spültechnik, zur Badpflege, zur Standzeitverlängerung und zur Rückgewinnung von Wirkchemikalien evaluiert und in den Studien beschrieben. In den Projekten ZERMEG I und II wurden dabei ausschließlich Einsparungsmaßnahmen für Prozesswasser und Chemikalien in der Galvanik betrachtet. Die Erkenntnisse aus den Projekten flossen zum Teil in das Projekt EFOR ein, wobei versucht wurde diese auf den Bereich der Teilereinigung umzulegen.
- ZERIA 3 – Zero Emissions Research in Austria: Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde aufbauend auf die Vorläuferprojekte ZERIA 1 und ZERIA 2 praktische Anwendungen abfall- und emissionsfreier Verfahren und Technologien getestet. Auf Basis der theoretischen Arbeiten zur vollständigen Kreislaufschließung in Teilbereichen der industriellen Fertigung wurden abfall- und emissionsfreie Verfahren in ausgewählten Branchen erprobt, wobei der Schwerpunkt in der Metallindustrie lag. Es sollte im Zuge des Projektes nachgewiesen werden, dass abfall- und emissionsfreie Verfahren wirtschaftlich und technisch umsetzbar sind.
- Prozessintegrierte Wasser- Abwassertechniken: Im Rahmen des Zukunftsfond Steiermark Projektes wurden Abwässer eines nasschemischen- mechanischen Gleitschleifereiprozesses untersucht. Der Reinigungsprozess der Werkstücke erfolgte mit emulgierenden Tensiden. Das Ziel war die Entfernung der Fette und Harze und die Rückgewinnung der waschaktiven Tenside. Es konnte gezeigt werden, dass mit polymeren Flockungsmitteln auf Resinaminbasis die Fette und Harze aus dem Wasser entfernt und eine Tensidteilgewinnung von 40 - 60 % erzielt werden kann. Eine Kreislaufschließung des gereinigten Prozesswassers war durch Aufsalzungseffekte und dadurch Minimierung der Reinigungsleistung der eingesetzten Reinigungstenside nicht möglich.

2.3 Fokus/Schwerpunkte der Arbeit

Die Hauptstoßrichtung des Projektes EFOR – Emissionsarme Reinigungsprozesse bestand in der Erbringung des Nachweises, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht losgelöst vom Produktionsprozess, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Diesbezüglich wurden mögliche Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Rahmen von Laborversuchen und Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Dabei wurden die Projektinhalte in Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium erarbeitet, wobei diese nachstehende Projektschwerpunkte beinhalteten:

6. Analyse von Reinigungsprozessen im Bereich der Automobilzulieferindustrie
7. Evaluierung von Methoden zur Charakterisierung von Reinigungsprozessen

8. Screening möglicher Verfahren und Technologien zur Aufbereitung verbrauchter Waschmedien und Durchführung von Labor- und Technikumsversuchen
9. Erarbeitung von Optimierungskonzepten und Durchführung von Versuchen unter realen Betriebsbedingungen
10. Ökonomische und ökologische Beurteilung der adaptierten Reinigungsprozesse

Die Arbeiten im Rahmen der Analyse von Reinigungsprozessen umfassende dabei die Analyse und Evaluierung von mechanischen und nasschemischen Reinigungsverfahren, von Technologien zur effektiven Störstoffentfernung im Bereich der Waschbadaufbereitung und der Evaluierung von Reinigungschemikalien. Da für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken in der Automobilindustrie die Überwachung der Reinigungsbäder und Reinigungsleistung einen entscheidenden Beitrag liefert, wurden im Rahmen der Arbeiten des Weiteren Methoden zur Charakterisierung von Reinigungsprozessen evaluiert. Eine umfassende Darstellung nach dem Stand der Technik findet sich im Anhang und soll dem Leser als Leitfaden bzw. Orientierungshilfe bei der Lösung von Problemstellungen im Bereich der Reinigung von metallischen Oberflächen dienen

Die praktischen Arbeiten im Labor und Technikumsmaßstab bzw. in den Betrieben der Wirtschaftspartner umfassten die Analyse von Waschprozessen und alle damit in direkten Zusammenhang stehenden Prozessen und Ressourcen. Anhand detaillierter Prozessanalysen wurden einerseits bestehende Technologien zur Aufbereitung von Reinigungsbädern analysiert. Andererseits wurden durch Labor-, Technikums- und Pilotversuchen die Voraussetzungen zur Adaptierung bestehender Reinigungs- und Aufbereitungskonzepte geschaffen. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in weiterer Folge Optimierungskonzepte erarbeitet und im Rahmen von zwei Konzepten bereits im Zuge der Projektbearbeitung zur Umsetzung gebracht. Die Arbeiten im Rahmen der Konzeptumsetzung beinhalteten dabei auch die ökonomische und ökologische Bewertung der Optimierungskonzepte.

2.4 Einpassung in der Programmlinie

Das Projekt EFOR – Entwicklung emissionsarmer Reinigungsprozesse für Werkstückoberflächen mit besonderer Berücksichtigung von Produktionsprozessen der Automobilzulieferindustrie entspricht den Zielsetzungen der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“, wobei das Projekt dem Schwerpunkt „Technologie und Innovation bei Produktionsprozessen“ innerhalb der vierten Ausschreibung entspricht. Dabei wurde dem Ziel der deutlichen Reduktion des Ressourceneinsatzes im Hinblick auf Verbesserungen im Gesamtsystem Rechnung getragen indem Reinigungsprozesse optimiert und Lösungskonzepte zur effektiven Störstoffentfernung und der Badstandzeitverlängerung erarbeitet wurden. Das priore Ziel bestand dabei in der Erarbeitung von Lösungskonzepten, die ein optimiertes Zusammenspiel zwischen eingesetzten Prozesshilfsmittel, Prozessführung, eingesetzter Reinigungstechnologien und den im System integrierten Präventivmaßnahmen zur Störstoffentfernung gewährleisten und so durch Betrachtung der gesamten Fertigungskette wesentlich zur Erhöhung der ökonomischen und ökologischen Effizienz beitragen.

2.5 Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichtes

Der vorliegende Endbericht zum Projekt *EFOR – Entwicklung emissionsarmer Reinigungsprozesse für Werkstückoberflächen mit besonderer Berücksichtigung von Produktionsprozessen der Automobilzulieferindustrie* entspricht den Hinweisen zur Berichtslegung und projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit für Projekte im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig wirtschaften. Diese umfasst nachstehende Gliederung:

Kapitel 2 – Allgemeine Einführung in die Thematik der Reinigung von Werkstückoberflächen im Bereich der Herstellung von Bearbeitung von Metallbauteilen

Kapitel 3 – Kurze Darstellung der Ziele des Projektes EFOR

Kapitel 4 – Darstellung der Ergebnisse der Versuche und der erarbeiteten Lösungskonzepte

Kapitel 5 - Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

Kapitel 6 - Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Kapitel 7 - Ausblick / Empfehlungen

Kapitel 9 – Umfassende Darstellung über gängige Reinigungsverfahren, Reinigungschemikalien, Aufbereitungsverfahren und Maßnahmen zur kontinuierlichen Überwachung von Reinigungsbäder und der Reinigungsleistung

3 Ziele des Projektes

Das Projektziel bestand in der Optimierung von Reinigungsprozessen durch Erarbeitung ganzheitlicher Lösungskonzepte. Dadurch sollte der Nachweis erbracht werden, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht losgelöst vom Produktionsprozess, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Die Konzepte zur Verfahrensumstellung sollten zu Projektende eine direkte, wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung in einem Demonstrationsprojekt ermöglichen, wobei beim vorliegenden Projekt bereits innerhalb der Projektbearbeitung Teilewaschanlagen optimiert und die Standzeiten von Waschbädern um ein vielfaches erhöht wurden.

Grundsätzlich ist der Prozess der Werkstückreinigung wesentlich für die Qualität des Endproduktes verantwortlich. Die Produktqualität und der jeweilige Reinigungsprozess definieren demnach die Anforderungen an die Qualität des Reinigungsmediums, wobei sich diese je nach Werkstoff, Werkstückform, Fertigungsschritt und der eingesetzten Prozesshilfsmittel / Art der Oberflächenverschmutzung grundlegend unterscheiden können. Reinigungssysteme benötigen für eine praxisnahe Optimierung daher den Einsatz innovativer Reinigungsverfahren und –konzepte, um den Reinigungsprozess optimal auf die Reinigungsanforderungen abstimmen zu können.

Ergebnisse früherer Projekte im Bereich der Oberflächenveredlung von Metallen haben dabei eine gute Grundlage für diese nachhaltige Gestaltung nasschemischer Reinigungsprozesse geschaffen. Im Rahmen der Projektbearbeitung sollten darauf aufbauend Reinigungsprozesse aus verwandten Branchen mit ihrem Fertigungsumfeld analysiert und innovative Optimierungsmaßnahmen für den Bereich der Teilereinigung erarbeitet werden.

Durch Erprobung innovativer Technologien Verfahrenskombinationen sollte eine möglichst weitgehende Schließung von Wasserkreisläufen und Rückgewinnung von Reinigungschemikalien geschaffen werden. Hierfür sollten Reinigungsprozesse in den Betrieben der Wirtschaftspartner analysiert und die Grundlagen für eine weitgehende Verfahrensoptimierung geschaffen werden.

4 Inhalte und Ergebnisse des Projektes

4.1 Verwendete Methoden und Daten

Die Arbeiten im Rahmen des Projektes EFOR umfassten nachstehende Arbeitspakete:

- Analyse von Reinigungsprozessen in der Automobilzulieferindustrie
- Methoden zur Charakterisierung der Reinigungsprozesse
- Praktische Arbeiten im Labor und Technikum
- Praktische Arbeiten in den Betrieben der Wirtschaftspartner
- Ökonomische und ökologische Beurteilung der Technologieanwendungen

Die Arbeiten im Rahmen der Analyse von Reinigungsprozessen umfassende dabei die Evaluierung möglicher Technologien zur effektiven Störstoffentfernung im Bereich der Waschbadaufbereitung und zur systematischen Pflege von Kühlschmieremulsionen.

Da für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken in der Automobilindustrie die Überwachung der Reinigungsbäder und Reinigungsleistung einen entscheidenden Beitrag liefert, wurden im Rahmen der Arbeiten des Weiteren Methoden zur Charakterisierung von Reinigungsprozessen evaluiert. Durch die Bestimmung der Badbelastung und der noch vorhandenen Reinigerkonzentration kann der optimale Zeitpunkt für den Badwechsel ermittelt und somit der Ressourcenbedarf auf ein Optimum reduziert werden.

Die praktischen Arbeiten im Labor und Technikumsmaßstab bzw. in den Betrieben der Wirtschaftspartner umfassten die Analyse von Waschprozessen und alle damit in direkten Zusammenhang stehenden Prozessen und Ressourcen. Anhand detaillierter Prozessanalysen wurden einerseits bestehende Technologien zur Aufbereitung von Reinigungsbädern analysiert. Andererseits wurden durch Labor-, Technikums- und Pilotversuchen die Voraussetzungen zur Adaptierung bestehender Reinigungs- und Aufbereitungskonzepte geschaffen.

Für die Charakterisierung der eingesetzten Prozesschemikalien, der Reinigungsleistung und der Demulgierfähigkeit der Tenside wurden physikalisch-chemische, kolloidchemische und tensiometrische Methoden herangezogen. Zur Erhöhung der Badstandzeiten wurden mechanische und chemisch-physikalische Aufbereitungsverfahren erprobt, wobei in zwei Anwendungsfällen bereits Aufbereitungstechnologien in den Reinigungsprozess integriert wurden. Zur Charakterisierung der Reinigungsprozesse, der Prozesschemikalien, der Reinigungsleistung und der Demulgierfähigkeit wurden nachstehende Methoden herangezogen:

Durchführung von Stoffflussanalysen

Die Durchführung von Stoffflussanalysen erfolgte mit der Software STAN 2 des Instituts für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der TU Wien. Mittels der Software STAN 2 können Systembilder mittels vorgefertigter Komponenten (Prozesse, Flüsse,

Systemgrenze, Textfelder) erstellt werden. Unbekannte Größen können nach Eingabe der vorhandenen Daten rechnerisch ermittelt werden.

Bestimmung der quantitativen Oberflächenladung

Die Bestimmung erfolgte mit der Methode der Streaming Current Titration im Gerät PCD 02 der Fa. Mütek. Mit dem Partikelladungsdetektor (PCD) wird das Strömungspotential von Polyelektrolyt- und Tensidlösungen gemessen. Die quantitative Ladungsmenge der Probe wird durch Titration mit einem entgegengesetzt geladenen Standard-Polyelektrolyt ermittelt.

Bestimmung der organischen Belastung

Für die Ermittlung der organischen Belastung der Reinigungsbäder wurde der Fettgehalt nach einer Dichlormethan-Extraktion gravimetrisch bestimmt. Die Bestimmung des CSB-Gehalt erfolgt nach Schwefelsäureaufschluss und Farbreaktion photometrisch mit Hach-Lange Testküvetten LCK 114.

Bestimmung des Builder- und Tensidgehaltes

Für die Ermittlung des Buildergehaltes in den Reinigungsbädern wurde die ortho-Phosphatbestimmung mit Hach-Lange Testküvetten LCK 350 herangezogen. Die nichtionischen Tenside (Ethoxylate) werden dabei nach Komplexbildung in Dichlormethan extrahiert und photometrisch bestimmt (Hach-Lange LCK 333). Die Bestimmung der anionischen und kationischen Tenside erfolgte nach Farbreaktion und Extraktion in Chloroform photometrisch (Hach-Lange LCK 332 und LCK 331).

Bestimmung der Oberflächenspannung und kritischen Mizellbildungskonzentration

Die Bestimmung der Oberflächenspannung erfolgte mit dem Tensiometer K12 der Firma Krüss nach der Wilhelmy-Plattenmethode. Für die Bestimmung der Kritischen Mizellbildungskonzentration wurde die Oberflächenspannung in Abhängigkeit der Tensidkonzentration gemessen. Nach Erreichen der CMC bleibt die Oberflächenspannung mit zunehmender Tensidkonzentration konstant.

Bestimmung der Trübung der O/W Emulsion

Die Bestimmung der Trübung der O/W Emulsionen erfolgte mit dem Pocket Turbidimeter der Fa. Hach.

Bestimmung der Stabilität der O/W Emulsion

Die Emulsionsstabilität wurde mittels einer Zentrifugationsmethode im Zentrifugalfeld mit der Lumifuge 114 der Fa. LUM ermittelt. Die LUMiFuge 114 ist eine Analysenzentrifuge und dient der Bestimmung des Entmischungsverhaltens konzentrierter Suspensionen. Mittels orts- und zeitaufgelöster Transmissionsmessungen werden die Veränderungen bei der Entmischung in Suspensionen festgehalten. Das Ergebnis ist ein Transmissionsprofil, welches über den Messradius aufgezeichnet wird. Die Auswertung erfolgte nach dem Integrationsmodus.

Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Öltröpfchen

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfolgte im Gerät BI-90Plus der Fa. Brookhaven. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Photonenkorrelationspektroskopie (PCS) an quasielastisch gestreutem Licht (QELS). Die dynamische Lichtstreuung (DLS) ist eine Methode zur Bestimmung der Größe von Partikeln in Lösungen.

Membranfiltrationsversuche mit der Laboranlage

Für die Crossflow Filtrationsversuche im Labormaßstab standen zwei Membranfiltrationsanlagen (Mikro- und Ultrafiltrationsverfahren) zur Verfügung. Beide Anlagen können mit Flachmembranen oder Hohlfasermembranen betrieben werden.

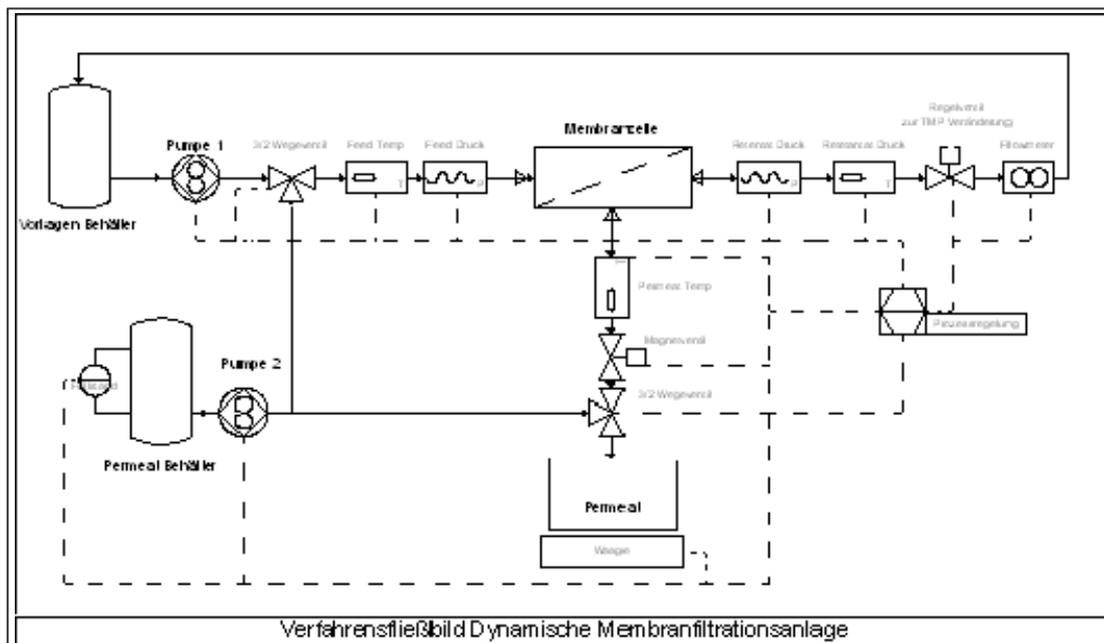


Abbildung 1: Verfahrensschema Crossflow-Mikrofiltrationsanlage mit periodischer Rückspülvorrichtung

Die Feedlösungen können mit Flussraten von 80 [ml/min] bis 1000 [ml/min] pulsationsfrei mit der Zahnradpumpe Z 1830 der Fa. Ismatec bis zu einem Druck von 1 [bar] bzw. mit der Elektrozahnradpumpe 8000-18 ID der Fa. Scherzinger Pump Technologie bis zu Drücken von 8 [bar] gefördert werden. Die Druckdifferenz p_1-p_2 lässt sich über ein Druckregelventil zusätzlich auf einen höheren konstanten Transmembrandruck bei gleichbleibender Überströmung einstellen. Durch die zwei unabhängigen Kühlkreisläufe ist eine Temperierung der Feedlösung und der Membranzelle möglich. Für den Abtransport der gebildeten Polarisations- und Deckschicht wird die periodische Rückspülvorrichtung eingesetzt. Die Anlagen werden von einer zentralen Prozessregelung parametrisiert und überwacht sowie die Messdaten erfasst und analysiert.

Membranfiltrationsversuche mit Technikumsanlage

Die Membranversuchsanlage ist für die Filtration von Flüssigkeiten von ca. 40 – 48 [l/h] bei Drücken bis 64 [bar] einsetzbar, wobei die Versuchsanlage mit einer Zelle für Flachmembranen mit einer Filterfläche von 50 [cm²] ausgestattet ist. Des Weiteren ist die Anlage so ausgelegt, dass

sowohl Dead-end- als auch Crossflow-Filtration möglich ist. Für die Crossflow-Filtration sind in Abhängigkeit vom Membrantyp Druck und Durchfluss bzw. Druck und Überströmung frei wählbar.

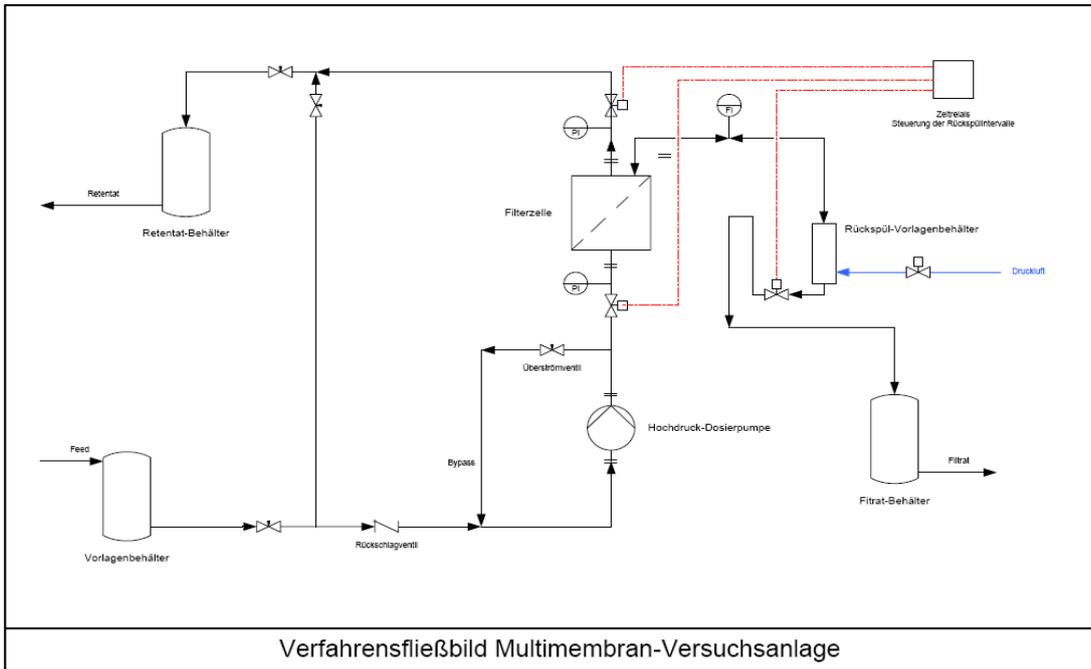


Abbildung 2: Verfahrensschema der mobilen Membran-Versuchsanlage (Technikumsanlage)

Membranfiltrationsversuche mit Pilotanlage

Für die Ultrafiltrationsversuche mit der Pilotanlage wurde ein Rohrmodul der Fa. Ultra CUT (UC 110 PPES 10080 E 6 CS; Abscheidefähigkeit 100 kDa) verwendet. Für den Versuch wurde eine Überströmungsgeschwindigkeit von 15 [m³/h] gewählt. Die Überströmungsgeschwindigkeit als auch die Druckdifferenz $p_1 - p_2$ ist bei der eingesetzten Anlage über Regelventile steuerbar. Die Anlage wird über eine zentrale Steuereinheit geregelt und die Messdaten online erfasst. Die Probeentnahme des Permeats erfolgte über das Entnahmeventil auf der Modulausgangsseite, die Probe der Feedlösung wurde dem Vorlagebehälter entnommen.

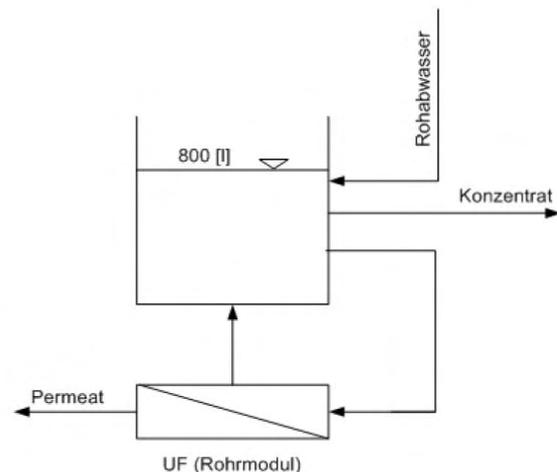


Abbildung 3: Pilotanlage – Membranfiltrationsversuche unter realen Betriebsbedingungen

Die Aufbereitung des Abwassers erfolgt durch diskontinuierliche Beschickung eines 1 [m³] Vorlagebehälters. Je nach eingesetztem Rohrmodul können die Parameter Ein- und Ausgangsdruck, Überströmungsgeschwindigkeit über Regelventile gesteuert werden. Die Erfassung der Parameter Ein- und Ausgangsdruck, Überströmungsgeschwindigkeit erfolgt online, wobei je nach Anwendungsfall weitere Sensoren zur Online-Erfassung in die Anlage integriert werden können. Der Parameter Temperatur wurde im gegebenen Fall über eine analoge Messeinheit erfasst. Das Permeat wird in einem nachgeschalteten Behälter (150 l) aufgefangen, das Retentat wird dem Vorlagebehälter rückgeführt. Bei Erreichen des max. Füllstands im Permeatbehälter wird selbiges über eine Tauchpumpe abgezogen und einem 1 [m³] Container zugeführt. Die Rückspülung erfolgt manuell mit dem Permeat aus dem Permeatbehälter (150 l). Des Weiteren kann zur chemischen Reinigung des Rohrmoduls die Anlage über den Permeatbehälter im Kreislauf gefahren werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen, ermittelt auf Basis der beschriebenen Methoden, wurden anhand von Fallbeispielen Lösungskonzepte für einen optimierten Ressourceneinsatz bei der Teilereinigung erarbeitet. In einem Betrieb der Wirtschaftspartner wurden bereits im Zuge der Projektbearbeitung zwei Waschanlagen durch Integration erweiterter Badaufbereitungsmaßnahmen optimiert. Die ökonomische Beurteilung der erarbeiteten Verfahrenskonzepte erfolgte dabei nach einer Kostenvergleichsrechnung, wobei die Kosten für die Bereitstellung von Prozesshilfsmitteln (Reinigungschemikalien) und der Kosten für die Wasserbereitstellung und Abwasserentsorgung berücksichtigt wurden.

Die ökologische Beurteilung der erarbeiteten Verfahrenskonzepte erfolgte nach der Methode des Sustainable Process Index. Dabei wird anhand der Beurteilung der Input- und Outputströme die Fläche berechnet, die man aufbringen muss, um den Lebenszyklus eines Produktes oder die Beschaffung desselben zu gewährleisten. Besonders berücksichtigt werden dabei nachhaltige Prozesse und Prozessketten im Ökosystem. Diese Bewertung folgt zwei allgemeinen Prinzipien: der Einbettung von Materialflüssen in globale Prozessflüsse und der Abstimmung der Flüsse zwischen Umwelt und der lokalen Assimilationskapazität. Das heißt, dass bei der Berechnung des Verbrauches der so genannte Mehrverbrauch und bei Emissionen die Mehremissionen betrachtet werden.

4.2 Beschreibung des Standes der Technik und Innovationsgehalt des Projektes

Eine umfassende Darstellung des Standes der Technik findet sich im Anhang unter Kapitel 9. Anhand einer Literaturstudie und Internetrecherche wurden Reinigungsverfahren, Reinigungssysteme und Aufbereitungsverfahren näher beleuchtet und die wesentlichen Punkte zusammengefasst. Dabei wurde teilweise auf die sehr umfassende Darstellung von Reinigungsverfahren und Reinigungssystemen nach dem Stand der Technik unter <http://www.bauteilreinigung.de> zurückgegriffen.

Dabei zeigte sich, dass die Entwicklung nasschemischer Reinigungsverfahren stark in Richtung komplexer Anlagen mit integrierter Störstoffentfernung und Prozessüberwachung geht. Zwei Drittel der nasschemischen Reinigungsverfahren arbeiten mit wässrigen Reinigungslösungen, die entweder allein oder in Kombination mit oberflächenaktiven Stoffen, mechanischer Kraft und Temperatur angewendet werden. In der Nassreinigung wurden in den letzten Jahren einige Verfahren (weiter-)entwickelt, die hinsichtlich Qualität und Kosten enorme Verbesserungen gebracht und Verfahren auf Basis organischer Lösungsmittel ersetzt haben.

Verfahrenstechnisch geht der Trend eindeutig dahin, den Reinigungsprozess in die Fertigungskette zu integrieren und auf die spezifischen Erfordernisse abzustimmen. Um den produktions- und prozessbedingten Erfordernissen unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte gerecht zu werden, ist eine detaillierte Analyse der Fertigungskette allerdings unumgänglich.

In den letzten Jahren wurden bei Einsatz von wässrigen Behandlungsverfahren zudem neu entwickelte Reinigungstenside verwendet. Die herkömmlichen Tenside besitzen emulgierende Eigenschaften und halten die von den Werkstoffen abgelösten Verschmutzungen in Lösung. Die neu entwickelten Tenside zeigen nach dem Reinigungsprozess wieder demulgierende Eigenschaften, die abgelösten Verschmutzungen werden somit abgetrennt. Je nach dem verwendeten waschaktiven Tensid kann das anfallende Wasser unterschiedlich nachbehandelt werden:

- Einsatz von neu entwickelten demulgierend arbeitenden Reinigungstensiden und Abtrennen des freien Öls mittels Skimmer, Ölabscheider, Zentrifugalseparatoren,...
- Einsatz von herkömmlichen emulgierenden Reinigungstensiden und physikalisch- chemische Reinigungsverfahren und/oder Membranfiltration der Schadstoffe

Ein wichtiger Aspekt für die Kosten ist die Möglichkeit, diese eingesetzten Chemikalien im Kreislauf zu führen, um den Wasser- und Chemikalienverbrauch zu reduzieren. Bei der Verwendung von emulgierenden oder demulgierenden Einkomponentenreinigersystemen ist eine Kreislaufschliessung durch die Aufkonzentrierung der Builder (Aufsalmung) im Wasser allerdings nur bedingt möglich. Die beschriebenen Reinigungskemikalien bestehen hauptsächlich aus Buildersubstanzen (Phosphate, Silikate) und oberflächenaktiven Tensiden. Bei dem Reinigungsprozess werden diese Tenside verbraucht und die Builder verbleiben in der Reinigungslösung, die eine Aufsalmung des Recyclingswassers verursachen und die Reinigungsleistung kontinuierlich herabsetzen.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten bestand daher auch in der Erarbeitung von Maßnahmen und Konzepten, die darauf abzielen, dass so wenig wie möglich an Ressourcen (Reinigungsmittel und Wasser als Lösungsmittel für die Reiniger und Transportmittel für die Verunreinigungen) zur Erzielung der notwendigen Reinheit der Werkstückoberflächen eingesetzt werden muss. Diesbezüglich wurden mögliche Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Rahmen von Laborversuchen und Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht.

4.3 Beschreibung der Projektergebnisse

Neben der Evaluierung geeigneter produktionsintegrierter Technologien zur Erhöhung der Kosten- und Ressourceneffizienz im Bereich der Teilereinigung, wurden anhand ausgewählter Technologien Versuche zur weitergehenden Störstoffentfernung und der selektiven Rückgewinnung von Reinigungschemikalien durchgeführt. Vor dem Hintergrund eines effizienten Ressourceneinsatz wurden Lösungskonzepte für Betriebe der am Projekt beteiligten Wirtschaftspartner unter Berücksichtigung der nachstehenden Punkte erarbeitet:

- Erbringung des Nachweises, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht losgelöst vom Produktionsprozess, sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden
- Aufzeigen von Möglichkeiten zur systematischen Pflege und Überwachung von Waschbädern (und Kühlschmieremulsionen)
- Versuchsdurchführung unter realen Betriebsbedingungen und begleitende Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen
- Sensibilisierung von Betrieben und deren Mitarbeitern hinsichtlich der zentralen Stellung von Reinigungsprozessen innerhalb der Fertigungskette

Zu Projektbeginn wurden in den Betrieben der Wirtschaftspartner 18 Teilwaschanlagen nach Anlagentyp, eingesetzter Reinigungschemikalien und Badstandzeit untersucht und mögliche Technologien zur effektiven Störstoffentfernung und der selektiven Chemikalienrückgewinnung evaluiert. In weiterer Folge wurden 5 Teilwaschanlagen unterschiedlicher Bauart einer detaillierten Analyse unterzogen und mögliche Optimierungsmaßnahmen erarbeitet. Vier der ausgewählten Maschinen arbeiten nach dem Spritzverfahren, wobei als Reinigungsmittel unterschiedliche Reinigungssysteme (alkalische Ein- und Zweikomponentenreinigersysteme, neutrale Kaltentfettersysteme) eingesetzt wurden. Eine Teilwaschanlage arbeitet nach dem Tauchverfahren, als Reinigungsmittel wird eine starke KOH-Lösung mit Tensidanteil eingesetzt.

Auf Basis der Charakterisierung der Reinigungsleistung (Abhängigkeit zur Badstandzeit) und der Evaluierung bestehender Maßnahmen zur Störstoffentfernung anhand der unter Kapitel 4.1 beschriebenen Methoden wurden erste Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt und in weiterer Folge im Zuge von Labor-, Technikums- und Pilotversuchen erprobt.

Ziel der Versuche war zum Einen die Evaluierung mechanischer und chemisch-physikalischer Badaufbereitungstechnologien unter Berücksichtigung der produktions- und prozessspezifischen Faktoren in den Betrieben der Wirtschaftspartner. Zum Anderen sollten die Versuchsergebnisse die Grundlagen für eine weitgehende Umstellung bzw. Optimierung bestehender Teilwaschanlagen mittels prozessintegrierter Schadstoffentfernung schaffen. Diesen Versuchen war eine breite Literaturrecherche bezüglich verschiedener Reinigungsverfahren, Reinigern und Badaufbereitungsverfahren vorausgegangen, um einen möglichst ganzheitlichen Überblick auf Reinigungsprozesse und den damit verbundenen Ressourceneinsatz zu erhalten. Eine

umfassende Darstellung nach dem Stand der Technik findet sich im Anhang und soll als Leitfaden bzw. Orientierungshilfe bei der Lösung von Problemstellungen im Bereich der Reinigung von metallischen Oberflächen dienen.

Im Zuge der Arbeiten am Projekt EFOR wurden Umsetzungskonzepte zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Bereich der Teilereinigung erarbeitet, wobei zwei Konzepte bereits innerhalb des Projektes EFOR umgesetzt wurden. Das Umsetzungskonzept der Teilwaschanlage 1 beinhaltet dabei die Integration eines erweiterten Ölabscheidersystems im Koaleszenz-Ölabscheider des Entfettungsbades. In einem weiteren Schritt wurde die Reinigungsformulierung umgestellt und die Waschbäder Spülung und Passivierung in das erweiterte Ölabscheidersystem integriert. Dadurch konnte nicht nur eine verbesserte Störstoffabscheidung erzielt werden, durch Umstellung der Reinigungsformulierung konnte auch die Verschleppung von Reinigungschemikalien reduziert werden.

Die Verfahrensanpassung wurde bereits während der Projektlaufzeit umgesetzt, wobei die Badstandzeiten von 5 auf 25 Wochen erhöht werden konnten. Um die Soll-Konzentration auf einem konstanten Niveau halten zu können wurden auch automatische Dosierpumpen zur Reinigerzudosierung im System integriert.

Eine Umstellung der Reinigungsformulierung auf ein Zweikomponentenreinigersystem für die Bäder Entfettung und Spülung ist im Zuge der weiteren Verfahrensanpassung angedacht. Die ökonomische Beurteilung des Waschprozesses erfolgte auf Basis der spezifischen Kosten und des Verbrauchs definierter Betriebsmittel. Die Verbrauchsdaten wurden durch Messungen und durch Auswertung gegebener Daten/Aufzeichnungen erhoben, wobei als Basis das Referenzjahr 2008 herangezogen wurde.

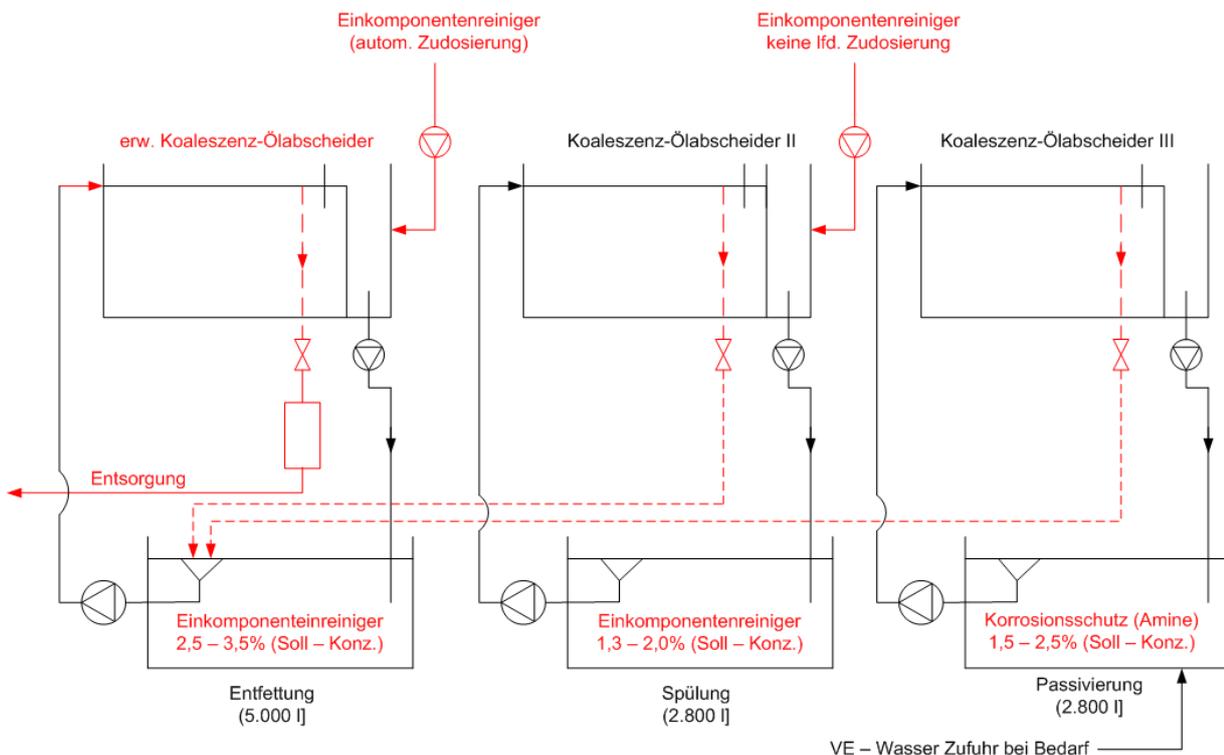


Abbildung 4: Ölabscheidersystem nach Verfahrensanpassung (Teilwaschanlage 1)

Zur Beurteilung der jährlichen Gesamtkosten wurden die spezifischen Betriebsmittelkosten herangezogen. Dabei zeigte sich, dass rd. 43% der Gesamtkosten dem Bereich des Chemikalienbedarfs zuzuordnen sind (die Kosten für die Wärmebereitstellung wurden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt). 23% der Gesamtkosten sind dem Bereich der Abwasseraufbereitung zuzuordnen, wobei dafür lediglich der Abwasseranfall bei Badwechsel berücksichtigt wurde (der diskontinuierlich Abzug von Waschmedien zur Regulierung der Badkonzentrationen konnten aufgrund fehlender Aufzeichnungen nicht berücksichtigt werden). Durch Adaptierung des Ölabscheidersystems kann auf Basis der durchgeführten Kostenanalyse von einer Reduktion der jährlichen betriebspezifischen Kosten zur Abdeckung des Chemikalienbedarfs, des VE-Wasserbedarfs und der Kosten zur Abwasserentsorgung von rd. 40 [%] ausgegangen werden.

Die Darstellung der ökologischen Auswirkungen wurde anhand der Methode des Sustainable Process Index durchgeführt. Dabei wurde anhand der Beurteilung der Input- und Outputströme die Fläche berechnet, die für die Durchführung des Prozesses aufgebracht werden muss. Dabei zeigte sich, dass 58 [%] des ökologischen Fußabdruckes (FAD) auf das eingesetzte Reinigersystem zurückzuführen sind. Weitere 17 [%] sind dem Bereich der Abwasseraufbereitung bzw. 15 [%] dem Bereich der VE-Wasser Bereitstellung zuzuordnen. Durch Adaptierung des Ölabscheidersystems kann auf Basis der durchgeführten ökologischen Analyse von einer Reduktion des notwendigen Flächenbedarfs von rd. 45 [%] ausgegangen werden, wobei rd. 68 [%] auf die Reduktion des Chemikalienbedarfs beruhen.

Das Umsetzungskonzept der Teilewaschanlage 2 beinhaltet die Integration eines 3-Phasen-Koaleszenzölabscheiders zur verbesserten Abtrennung freier Öle in der Hauptentfettung. Des Weiteren wurde der ursprünglich in der Hauptentfettung integrierte Lamellen-Ölabscheider im Vorentfettungsbad integriert und mit dem bestehenden Ölabscheider in Serie geschlossen.

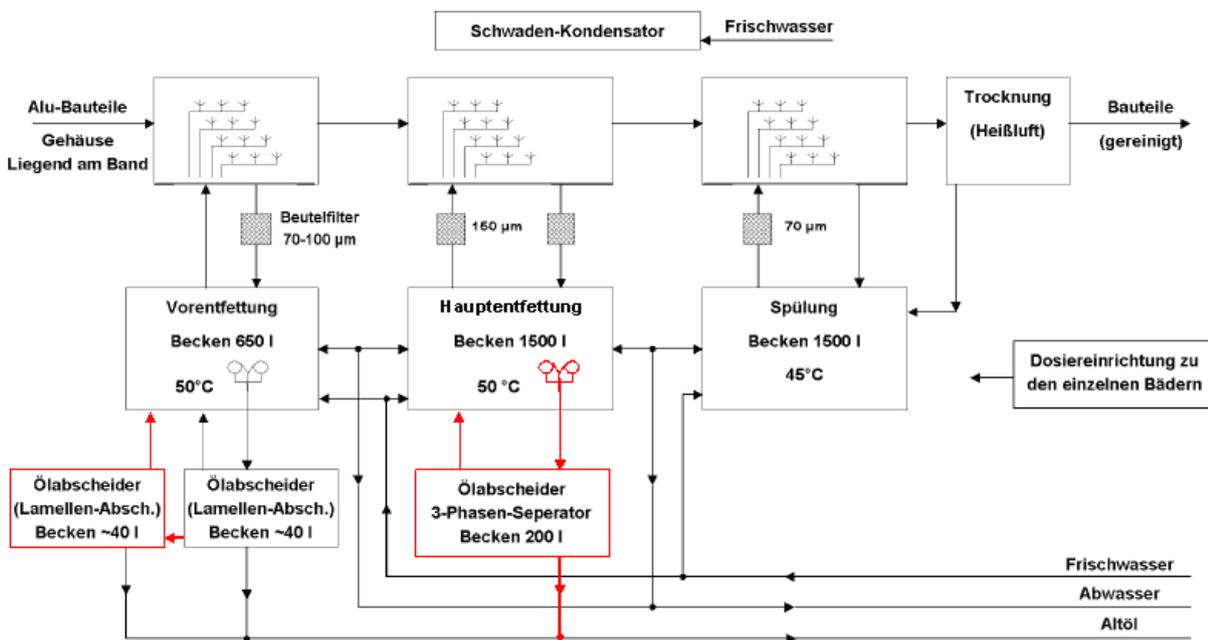


Abbildung 5: Ölabscheidersystem nach Verfahrensanpassung (Teilewaschanlage 2)

So konnte die Ölabtrennung in beiden Entfettungsbädern erhöht bzw. die Funktionsweise der herstellerseitig integrierten Ölabscheider verbessert werden.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurde des Weiteren die Umstellung der Reinigungschemie auf ein Zweikomponentenreinigersystem analytisch begleitet. Zweikomponentenreiniger-Systeme ermöglichen die getrennte Zudosierung von Tensiden und Buildern, wodurch eine gezielte Zugabe verbrauchter Reinigerbestandteile möglich ist. Dadurch kann die Anreicherung von Buildersubstanzen (Aufsalzung) verhindert und eine den Reinigungsanforderungen gerechte Chemikalienzudosierung durchgeführt werden. Durch Umstellung des Waschprozesses auf ein Zweikomponentensystem eröffnete sich die Möglichkeit, eine weitergehende Aufbereitung mittels Membranfiltration zu erproben. Grundsätzlich ist eine Aufbereitung von Waschbädern mittels Membranfiltration bei Verwendung von Einkomponentenreinigersystemen nur bedingt möglich, da die Nachdosierung von Vollprodukten zu einer Anreicherung von Buildersubstanzen und in weiterer Folge zu einer irreversiblen Verblockung der eingesetzten Membran führen kann.

Die Entwicklung von temperatur- und chemikalienbeständigen Membranen ermöglicht also den Einsatz der Mikro- und Ultrafiltration für die Trennung der Emulsionen. In letzter Zeit wurde dabei verstärkt die Mikrofiltration zur Badpflege herangezogen, da der Rückhalt von waschaktiven Tensiden durch die geringere Abscheideleistung reduziert werden kann. Dies bedingt allerdings auch eine Zunahme von Schadstoffen im Permeat, was durch die durchgeführten Versuche auch belegt werden konnte. Für eine Rückgewinnung der Reinigerkomponenten sind daher vor allem Kenntnisse über die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Reinigerprodukte (Hydrophilie, Mizellenbildungsvermögen, Aggregate...) und den Wechselwirkungen zwischen Öl und Tensid von entscheidender Bedeutung.

Grundsätzlich ist die Filtrierbarkeit von nichtionischen Tensiden von der Molekülstruktur, den Mizellen und den Wechselwirkungen zwischen Öl und Tensid abhängig. Je hydrophiler das Molekül, umso geringer ist der Tensidverlust. Die Hydrophilie eines nichtionischen Tensides wird beispielsweise durch die Länge der Oxethylenkette bestimmt. Nichtionische Tenside sind in Wasser löslich. Ihre Löslichkeit nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei Überschreitung der kritischen Mizellbildungskonzentration (CMC) wird mit Erhöhung der Temperatur eine zunehmende Trübung festgestellt. Die Temperatur, bei der die Tensidlösung eine maximale Trübung besitzt, wird daher Trübungspunkt oder Phaseninversionstemperatur genannt. Bei dieser Temperatur erfolgt eine Phasenauftrennung in eine tensidreiche Koazervatphase und eine wasserreiche Phase. In der tensidreichen Koazervatphase liegen die Tenside nicht mehr als Mizellen sondern als Agglomerate vor. In der Nähe des Trübungspunktes werden durch die Aufkonzentrierung der Tenside die maximale Reinigungswirkung und das geringste Schaumbildungsvermögen erzielt. Nachteilig ist die erhöhte Adsorptionsneigung der Tenside an Werkoberflächen, das auf die Dehydratisierung der nichtionischen Tenside in der Nähe des Trübungspunktes zurückzuführen ist. Ein Maß für die Stärke der Wechselwirkung zwischen Öl und Tensid ist die Wiederfindungsrate der Tenside, weil nur der in der wässrigen Phase vorhandene Tensidanteil filtriert werden kann.

Um die Filtrierbarkeit von Waschmedien mittels Ultramembranfiltration zu verifizieren, wurden im Zuge der Projektbearbeitung Ultrafiltrationsversuche mit den Vorentfettungs- und

Hauptentfettungsbad der Teilewaschanlage 2 im Labor-, Technikums- und Pilotmaßstab durchgeführt. Anhand ausgewählter Membranen wurden Filtrationsversuche zur Evaluierung des Retentionsverhaltens unter Berücksichtigung der Parameter Tensidkonzentration, Schadstoffbelastung, Überströmungsgeschwindigkeit und Temperatur bzw. die Effizienz von insitu-Reinigungsverfahren in Abhängigkeit zum Verblockungszustand der eingesetzten Membranen durchgeführt.

Das primäre Ziel bestand dabei in der Ermittlung der Trennleistung und des Retentionsverhaltens der untersuchten UF-Membranen für die organischen Inhaltsstoffe (Fette und Öle) und für die Reinigerprodukte (Nichtionische Tenside) des Entfettungsbades der Teilewaschanlage 2. Die Crossflow-Ultrafiltrationsversuche wurden dabei mit unterschiedlichen Überströmungsgeschwindigkeiten der Feedlösung von $1,06 \text{ ms}^{-1}$ bis $1,86 \text{ ms}^{-1}$ durchgeführt. Die UF-Membranen wurden mit der Feedlösung tangential überströmt und der Permeatfluss (Flux) und der totale Membranwiderstand (R_t) bei dem erreichten Transmembrandruck ermittelt. Die Feedlösung und die Permeate wurden auf ihre physikalisch-chemischen Parameter untersucht und das Retentionsverhalten der UF-Membranen für Fette/Öle und Tenside in Abhängigkeit der Druckdifferenz ermittelt.

Das Reinigungsbad wurde vor den Crossflow-Filtrationsversuchen für die Abtrennung der Feststoffe (Aluminiumabrieb) über einen Glasfaserfilter filtriert. Für die Auswahl einer geeigneten Ultrafiltrationsmembran und zur Ermittlung verfahrenstechnischer Parameter (Überströmungsgeschwindigkeit, transmembrane Druckdifferenz) wurden nachstehend beschriebenen Membranen eingesetzt.

Dabei zeigte das Membranscreening mit den Ultrafiltrationsmembranen UC 100 (Regenerierte Cellulosemembran; Abscheidefähigkeit 100 kDa), UP 150 (Polyethersulfonmembran; Abscheidefähigkeit 150 kDa) und US 100 (Polysulfonmembran; Abscheidefähigkeit 100 kDa), dass die regenerierte Cellulosemembran UC 100 mit einer Abscheidefähigkeit von 100 [kDa] die besten Filtrations- und Retentionseigenschaften für das Hauptentfettungsbad der Teilewaschanlage 2 aufweist. Eine hohe Permeabilität mit einem geringen Membranwiderstand wird erhalten. Die Membran retentiert unabhängig von dem Transmembrandruck 75 [%] der Fette und Öle. Mit zunehmender Überströmungsgeschwindigkeit und Transmembrandruck erfolgt eine Zunahme der Konzentration der nichtionischen Tenside im Permeat.

Die Polyethersulfonmembran UP 150 wies durch die Größe der Membranporen und den hydrophoben Eigenschaften Membranfouling auf. Es wurde eine geringe Permeabilität und durch Adsorption der Inhaltsstoffe in den Membranporen eine hohe Retention der Fette und Öle von 78 [%] und nichtionischen Tenside von 85 [%] ermittelt.

Die Polysulfonmembran US 100 besaß kein ausreichendes Trennverhalten für die Schadstoffe der Hauptentfettung. Die untersuchte Membran zeigte abhängig von der Überströmungsgeschwindigkeit eine Zunahme der Fette und Öle in den Permeaten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten deutlich, dass bei der Trennung von O/W Emulsionen der Kapillardruck der Öltröpfchen den limitierenden Faktor darstellt. Hydrophobe Membranen mit einem großen Porendurchmesser tendieren bei höheren Differenzdrücken durch die Benetzung der Membranoberfläche mit demulgierten Ölparkeln eher zu Fouling. Eine geringere Permeabilität und unzureichende Retention der Schadstoffe wird erhalten.

Die UF-Membran erzielte bei geringem Tensidgehalt der Entfettungsbäder die höchste Retention der nichtionischen Tenside. Mit zunehmendem Tensidgehalt im Entfettungsbad erfolgte eine Abnahme der Permeation. Dieser höhere Rückhalt ist auf Adsorption der nichtionischen Tenside zurückzuführen. Eine Erhöhung der Badbelastung bewirkt durch Koaleszenz der Öltröpfchen und Bildung einer hydrophoben Deckschicht einen geringen Permeatfluss, der mit zunehmender Druckdifferenz stark erniedrigt wird.

Die Filtrationsversuche in Abhängigkeit der Temperatur ergaben ein unterschiedliches Permeations- und Retentionsverhalten der UF-Membran. Das Entfettungsbad besaß bei einer Temperatur zwischen 35 [°C] und 40 [°C] eine geringe spezifische Trübung, die mit einem niedrigen Teilchendurchmesser der Öltröpfchen korrelierte. Bei dem Trübungspunkt des Tensides (25°C) und bei höheren Temperaturen (60°C) besaß das Entfettungsbad eine hohe Trübung und Partikeln mit hohem Durchmesser. Die Tenside reicherten sich in der Emulsionsphase an und wurden gemeinsam mit den emulgierten Öltröpfchen mit einer hohen Partikelgröße von der Membran retentiert. Die Retention der Schad- und Wertstoffe erfolgt dadurch in annähernd gleich hohem Ausmaß. Die Wasserphase besaß durch die Anreicherung der Tensidmoleküle in der Ölphase bei Temperaturen von 25 [°C] und 60 [°C] einen geringen Tensidgehalt. Demzufolge werden die Tensidadsorption und die Hydrophobierung der Membranoberfläche reduziert und resultieren in einen höheren Flux.

Eine Maßnahme zur Reduktion der gebildeten Deckschichten stellt die periodische Rückspülung dar. Mit einem optimal eingestellten Spülintervall kann die Permeabilität der UF-Membran für das Entfettungsbad um 30 % erhöht werden.

Die insitu-Reinigung zeigte, dass die gebildeten Deckschichten überwiegend reversible sind und in kurzen Filtrationsabständen mit Wasser bei einer Temperatur von 60 [°C] vollständig entfernt werden können.

Die Pilotversuche wurden in weiterer Folge mit der unter Kapitel 1.3. beschriebenen Versuchsanlage durchgeführt, wobei das Waschmedium des Entfettungsbades mit einer Überströmungsgeschwindigkeit von 15 [m³/h] über ein Rohrmodul mit einer Abscheideleistung von 100 [kDa] gepumpt wurde. Das anfallende Retentat wurde dem Vorlagebehälter rückgeführt, das Permeat in einem nachgeschalteten Behälter aufgefangen. Das abgetrennte Permeat wies bei einer CSB-Reduktion von im Mittel 80 [%] eine Rest-Tensidkonzentration (nichtionische Tenside) von im Mittel 1.100 [mg/l] auf, wodurch von einer ausreichenden Reinigungsleistung bei Wiedereinsatz des aufbereiteten Waschmediums ausgegangen werden kann. Es zeigte sich allerdings auch eine tendenziell niedrigere Rückgewinnungsrate von Tensidkomponenten

gegenüber Builderkomponenten, was mit Angaben in der Literatur korreliert und auf die teilweise Bindung der Tenside am retentierten Öl zurückzuführen ist.

Wie die durchgeführten Versuche zeigten, stellt die bestmögliche Abstimmung zwischen Reinigersystem und Membran einen entscheidenden Faktor für den wirtschaftlichen Einsatz der Membranfiltration im Bereich der Aufbereitung von Waschbädern dar. Da auch Buildersubstanzen wie Borate, Silikate, Alkalien, Phosphate und Komplexbilder teilweise durch die Membran zurückgehalten werden, ist bei der Auswahl von Reinigungssystemen auf die Vermeidung von Silikaten und die bestmögliche Abstimmung der sonstigen Gerüststoffe zu achten. Bei Einhaltung dieser Vorgaben können Buildersubstanzen die Membran zu 90 – 95 [%] passieren [Brunn, 2001]. Da Tenside durch die teilweise Bindung an Öl in höherem Maße aus dem System ausgeschleust werden als Buildersubstanzen, ist für eine verbrauchsgerechte Zudosierung der Einsatz von Zweikomponentenreiniger-Systemen (Modulare Reiniger) anzustreben.

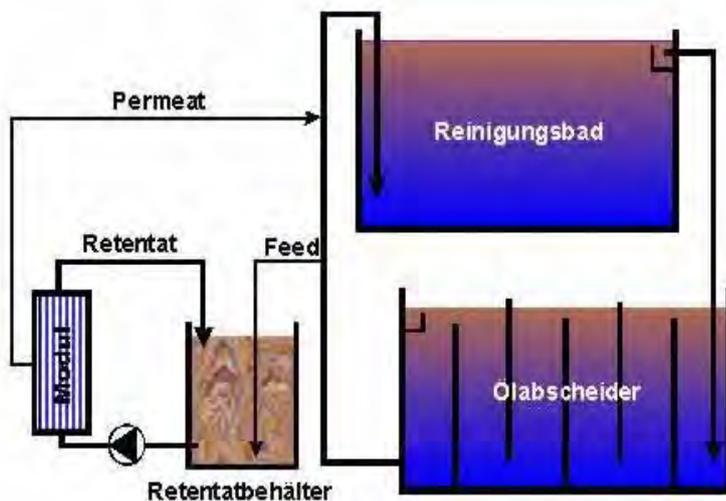


Abbildung 6: Aufbereitung eines wässrigen Reinigers mittels dezentraler Membranfiltration [Surtec, 2009]

Die Integration einer Ultrafiltrationsanlage zur weitergehenden Badaufbereitung wäre im betrachteten Fall grundsätzlich durch den diskontinuierlichen Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage im Bereich der zentralen Abwasseraufbereitungsanlage vorstellbar. Aufgrund des bestehenden Leitungssystems und der Möglichkeit der Nutzung eines Zwischenpuffers könnten die Waschmedien aller Teilewaschanlagen über die zentrale Membrananlage diskontinuierlich aufbereitet und wiederum als aufbereitetes Waschmedium in den Prozess rückgeführt werden. Die weitere Aufkonzentration des Retentates kann in weiterer Folge in der bestehenden Vakuumverdampferanlage erfolgen.

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde bereits ein Grobfilter im Bereich der zentralen Abwasserreinigungsanlage integriert, um Grobverunreinigungen wie Späne, Papier, Farbpartikel während notwendiger Anlagenreinigungen aus dem Waschmedium abzutrennen.

Durch diese Low-Cost Lösung besteht nun die Möglichkeit, gefiltertes Waschmedium nach erfolgter Anlageneinigung wiederum über das bestehende Leitungssystem zur jeweiligen

Teilewaschanlage rückzupumpen (Die Versuche waren zu Projektende noch nicht abgeschlossen und werden von Wirtschaftspartner weitergeführt).

Sofern sich das System bewährt, wäre die Integration einer zentralen Ultrafiltrations-Membrananlage zur Aufbereitung des Teilstroms „Teilewaschanlage“ als ganzheitliches Konzept wirtschaftlich vorstellbar. Grundvoraussetzung dafür wäre eine Einbindung aller Teilewaschanlagen unter Berücksichtigung der nachstehenden Punkte:

- Reduktion des Eintrages von Prozesshilfsmittel in den Waschprozess aus vorgelagerten Fertigungsschritten durch Reduktion von Verschleppungs- und Austragsverlusten
- Chemikalienanpassung und Anpassung der Reinigungsleistung an die geforderte Oberflächenqualität / Definition der Reinigungsanforderungen
- Optimierung / Adaptierung bereits integrierter Badaufbereitungstechnologien und bestmögliche Abstimmung mit dem bestehenden Konzepts der betrieblichen Wasserwirtschaft (VE-Wasserversorgung, Abwasseraufbereitung,...)
- Optimierte Reinigerzudosierung durch gezielte Überwachung der Prozessstabilität und Reinigungsleistung
- Optimiertes Zusammenspiel zwischen Maschinenrevisionen und der Aufbereitung von Waschmedien bzw. setzen von Präventivmaßnahmen zur Unterbindung biologischer Aktivitäten im Leitungssystem

Wie die Versuche und die Verfahrensanalysen gezeigt haben wird die Membranleistung von unterschiedlichen Einflussgrößen bestimmt, wodurch die Durchführung von Versuchen für jeden praktischen Anwendungsfall unumgänglich ist.

Die Charakterisierung und Analyse der Teilewaschanlagen 3 und 4 zeigte aufgrund der bereits gesetzten Präventivmaßnahmen und der daraus erzielbaren Badstandzeit unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte kein Optimierungspotential.

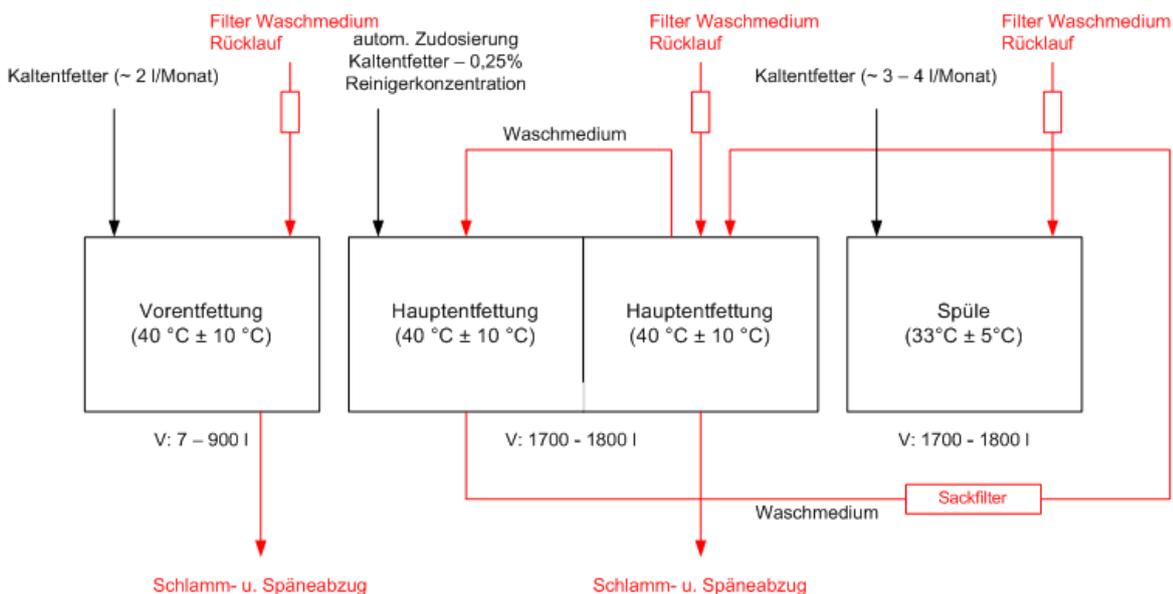


Abbildung 7: Präventivmaßnahmen zur Badstandzeitverlängerung der Teilewaschanlage 3 und 4

Mit dem Abzug von Schlamm und Spänen aus der Vor- und Hauptentfettung, dem Rücklauf des Waschmediums über Filter und der Schließung des Kreislaufes der Hauptentfettung über ein Sackfiltersystem werden Störstoffe in ausreichendem Maße aus dem System entfernt, wodurch Badwechsel lediglich im halbjährlichen Abstand notwendig sind. Diese Badwechsel werden auch vor dem Hintergrund der halbjährlichen Revision der Anlagen durchgeführt, um eine störungsfreie Funktionsweise über das Jahr garantieren zu können. Die Entfettungsbäder weisen jedoch naturgemäß aufgrund der hohen Standzeit eine hohe Fettbelastung auf. Trotz der hohen organischen Verschmutzung zeigen die Entfettungsbäder allerdings eine ausreichende Reinigungsleistung. Unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte erschien daher eine Optimierung bestehender Waschanlagen durch Integration weitergehender Badaufbereitungsmaßnahmen als nicht sinnvoll. Durch Untersuchung der Teilewaschanlagen 3 und 4 wurde daher die Wirkweise und Effizienz erwähnter Präventivmaßnahmen verifiziert, um die gesetzten Maßnahmen bei Anwendung von Kaltentfettern im Durchlaufspritzverfahren zu evaluieren und gegebenenfalls auf andere Anlagen zur Anwendung bringen zu können..

Grundsätzlich ist bei der Auswahl von Reinigungsverfahren und –systemen auf die vorliegenden Gegebenheiten (Werkstoff, Art des Verschmutzungseintrages, geforderte Oberflächenreinheit, Werkstückform, Werkstückdurchsatz, etc.) einzugehen. Polare Verschmutzungen lassen sich am Besten durch wässrige Reinigersysteme entfernen, die beste Wirkung gegen unpolare Verschmutzungen (die meisten Öle und Fette) lässt sich mit organischen Lösungsmitteln (Kohlenwasserstoff-Reiniger) erzielen. Die nachteiligen Eigenschaften der Kohlenwasserstoff-Reiniger (hohe Brand- und Explosionsgefahr, Toxizität) bedingen allerdings erhöhte arbeitsschutztechnische Maßnahmen, wodurch der wirtschaftliche Einsatz selbiger weitestgehend auf die allgemeine Metallentfettung beschränkt ist.

Kaltenfetter wie beispielsweise das in diesem Anwendungsfall eingesetzte Reinigungsmittel zählen zu den Neutralreinigern, wobei diese neben dem Hauptbestandteil Wasser meist aus Kombination aus nichtionischen (entschäumenden) und anionischen Tensidkomponenten bestehen. Diese Eigenschaften sind für eine Spritzeinigung von großer Bedeutung, da Neutralreiniger aufgrund ihres hohen nichtionischen Tensidanteils sehr schaumarm sind. Neutralreiniger zeichnen sich zudem durch ihre materialschonende Funktionsweise aus, wodurch sie verstärkt im Bereich der Reinigung von Leichtmetalloberflächen eingesetzt werden.

Die Arbeiten im Zuge der Analyse der Teilewaschanlage 5 beinhalteten neben der Charakterisierung der Teilewaschanlage und Reinigungsleistung auch die detaillierte Analyse der Fertigungskette. Bei der betrachteten Teilewaschanlage handelt es sich um eine Einkammer Waschanlage nach dem Tauchverfahren. Bei diesem Verfahren werden die Bauteile in das Reinigungsbad eingetaucht, wobei die Verschmutzungen vornehmlich durch die chemische Wirkung des Reinigers entfernt werden. Die unterschiedlich stark verunreinigten Stahlbauteile werden im gegebenen Fall bei einer Temperatur von 60 [°C] bis 80 [°C] und einer Verweilzeit von 20 Minuten von Kühlschmierstoffen und dem Mineralölprodukten abgereinigt, wobei als Reinigungsmittel eine stark alkalische KOH-Lösung mit Tensidanteil eingesetzt wird. Um eine

Rückstandsfreiheit zu erreichen werden die Bauteile nach dem Waschvorgang einem Spülvorgang unterzogen. Zudem wird aufschwimmendes Öl über eine Ölskimmer aus dem System entfernt und in weiterer Folge extern entsorgt. Weitergehende Maßnahmen zur Badaufbereitung sind nicht vorgesehen. Zur Sicherstellung einer optimalen Produktreinheit wird das Reinigungsbad der Entfettung im Schnitt im wöchentlichen Rhythmus gewechselt.

Zur Verifizierung des Störstoffeintrages in die Teilewaschanlage 5 wurde im Zuge der Projektbearbeitung eine detaillierte Prozessanalyse durchgeführt. Dabei wurden alle wesentlichen Fertigungsschritte einer näheren Beurteilung unterzogen, und ausgewählte Bauteile nach ihrer spezifischen Verunreinigung beurteilt. Die Bauteile wurden dabei mit einem Lösungsmittel abgereinigt und vor und nach dem Reinigungsschritt einer Gewichtsbestimmung unterzogen. Bezogen auf die Gesamtmasse zeigte sich dabei vor allem bei 3 Bauteileserien eine starke Verunreinigung mit dem eingesetzten Mineralölprodukt (2,2 – 4,5 g/kg Fertigprodukt).

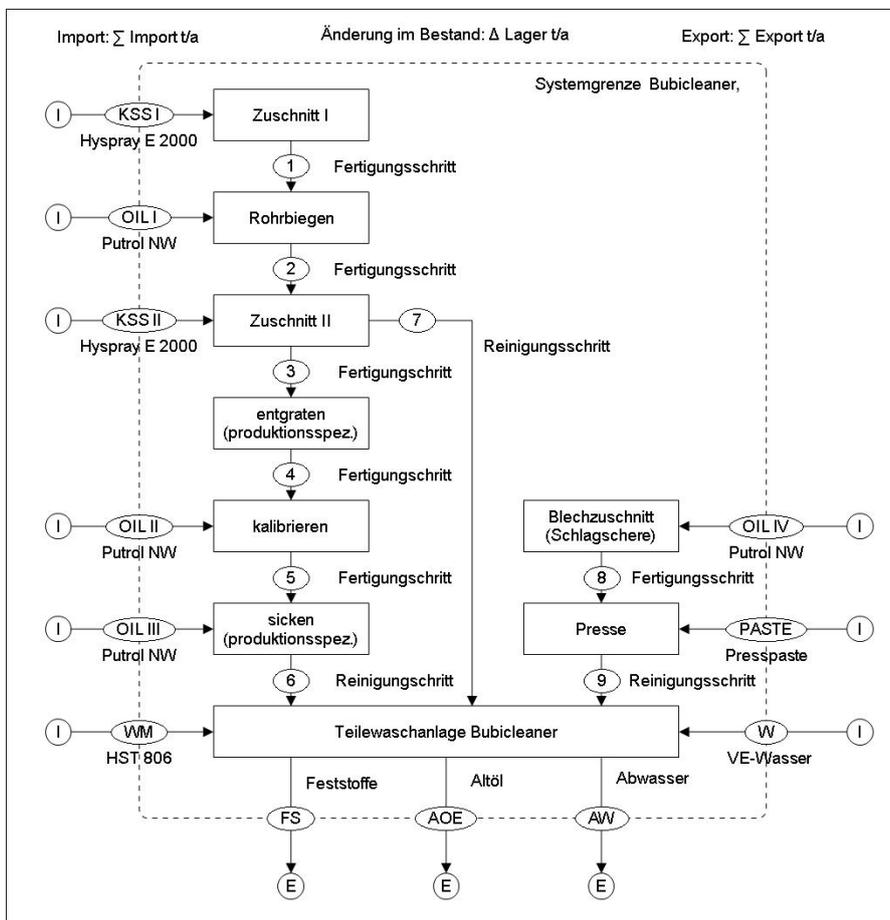


Abbildung 8: Prozessanalyse der Fertigungskette mit der Systemgrenze Teilewaschanlage

Bauteile des Fertigungsschrittes Zuschnitt zeigten primär eine Verunreinigung mit Metallspänen, wobei zur Verifizierung der spezifischen Verunreinigung nur der Fertigungsschritt Zuschnitt 2 näher betrachtet wurde. Die Bauteile des Fertigungsschrittes Zuschnitt 1 zeigten bei der visuellen Beurteilung ähnliche Verunreinigungen und wurden keiner näheren Beurteilung unterzogen.

Nach Schnitzer H. et al (2007) versteht man unter „Zero Emissions System“ ein System, in dem alle Stoff- und Energieströme, welche die definierte Systemgrenze überschreiten, ein Produkt sind, ein Rohstoff für eine andere Produktion oder zumindest keinen negativen Einfluss auf sowohl die ökologische, soziale oder ökonomische Umwelt ausüben. Dabei umfassen die Systemgrenzen entweder ein Einzelunternehmen, eine Gruppe von Unternehmen (Park oder Cluster) oder eine Region. Im gegebenen Fall wurde die Systemgrenze Teilewaschanlage (siehe Abbildung 8) mit den In- und Outputströmen Putrol NW (OIL 032), Hyspray E 2000 (OIL042), HST 806, VE-Wasser und Abwasser definiert. Die Systemgrenze wurde dabei um die Produktions- bzw. Fertigungskette gezogen, eine Speicherung von Emissionen innerhalb der Systemgrenze ist nicht vorgesehen.

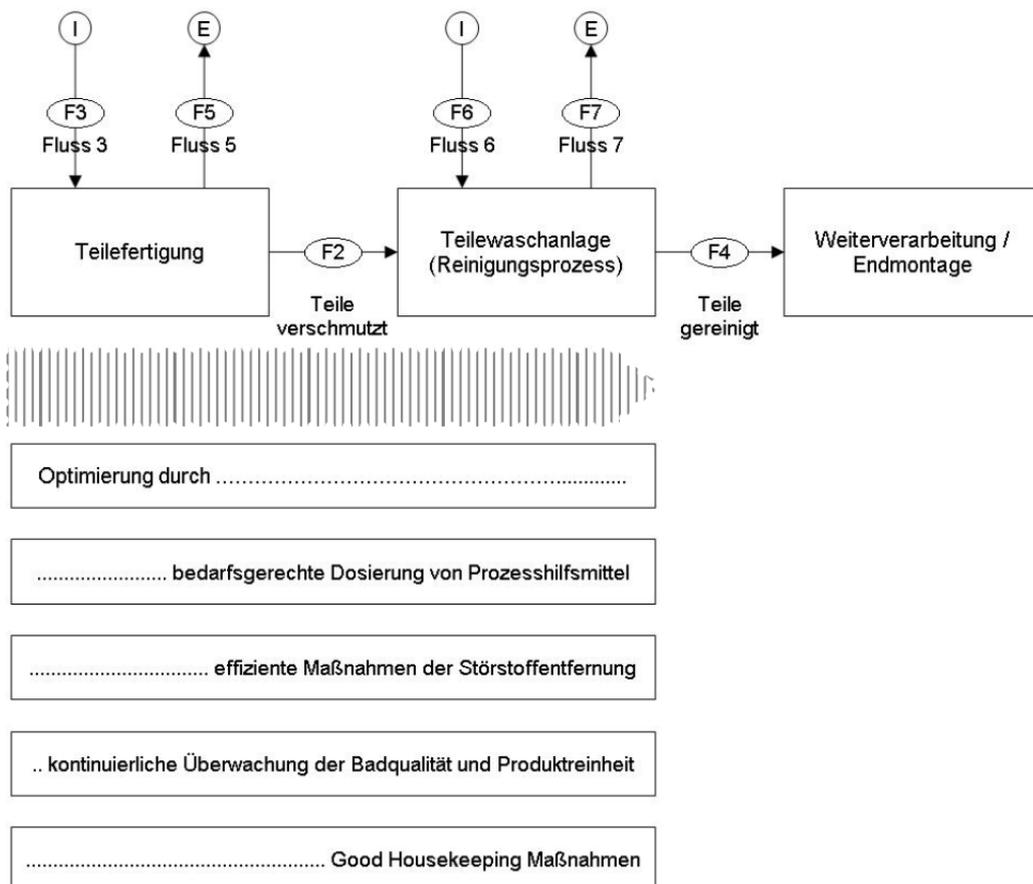


Abbildung 9: Gesichtspunkte zur Prozessoptimierung

Um nun ein optimiertes Zusammenspiel zwischen den eingesetzten Prozesshilfsmitteln, der Prozessführung, der eingesetzten Reinigungstechnologien und der im System integrierten Präventivmaßnahmen zur Störstoffentfernung zu gewährleisten, müssen die einzelnen Aktivitäten unter Berücksichtigung des Gesamtsystems „Teilewaschanlage“ aufeinander abgestimmt werden.

Dabei ist zu beachten, dass Reinigungs- bzw. Waschprozesse ungeachtet der Individualität der betriebstechnischen Lösung auf die jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen abgestimmt werden müssen, wobei diese auch bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind. Neben dem Bauteil (Werkstoff, Werkstückform, etc.) ist bei der Auswahl

geeigneter Reinigungssysteme und Optimierungsmaßnahmen auf die Art und Menge des Störstoffeintrages, auf den Werkstückdurchsatz, der geforderten Produkt- / Oberflächenreinheit aber auch auf etwaige arbeits- und umweltschutzrechtliche Anforderungen einzugehen. Diese ganzheitliche Betrachtung verlangt demnach auch eine Optimierung vorgelagerter Prozesse, um den Eintrag dort eingesetzter Prozesshilfsmittel in den Waschprozess zu reduzieren. Eine Optimierung dieser meist mechanischen Fertigungsprozesse kann zusätzlich zu einer Reduktion des Prozessmitteleinsatzes und Abfallaufkommens führen, da durch gezielte Präventivmaßnahmen eine Erhöhung der Standzeiten notwendiger Prozesshilfsmittel erreicht werden kann.

Zu diesen Präventivmaßnahmen zählen typischerweise *Good Housekeeping* Maßnahmen, wobei in diesem Fall speziell auf die Reduktion von Verschleppungen und der Vermeidung von Austrags- und Spritzverlusten hingewiesen wurde. Der Austrag von Prozesshilfsmittel (Putrol NW (OIL 032), Hyspray E 2000 (OIL042)) wirkt sich nicht nur auf die Höhe der dafür aufgewandten Kosten aus, durch verunreinigte Böden erhöht sich auch die Gefahr von Arbeitsunfällen. Des Weiteren kann es zu einer Reduktion des Reinigungsaufwandes in nachgeschalteten Waschanlagen kommen, da der Störstoffeintrag auf ein Optimum reduziert wird. Wenn auch nicht gänzlich, lassen sich Verschleppungs- und Austragsverluste bei Berücksichtigung der nachstehenden Punkte zumindest weitgehend minimieren:

- Abtropf- bzw. Abblaszonen – in der Serienfertigung könnte die Errichtung spezieller Saug-Blas-Systeme zur Reduktion der Austragsverluste beitragen, sofern diese aufgrund der Werkstückform einen effektiven und zeitnahen Einsatz ermöglichen
- Kapselung des Bearbeitungsraums – Spritzverluste können durch die Kapselung von Maschinen und der Anbringung von Spritzschutzwänden weitgehend vermieden werden
- Fertigungsnahe Teilereinigung – speziell bei stark verunreinigten Teilen (primär Fertigungsschritt Kalibrieren) bietet sich eine fertigungsnahe Teilereinigung an. Der Einsatz dezentraler Reinigungsanlagen bietet dabei vielfältigen Nutzen, weil sie individuell auf den jeweiligen Prozess abgestimmt werden können und auch zu einer effektiveren Auslastung bestehender zentraler Teilewaschanlage beitragen können.
Des Weiteren können die Werkstücke durch die Kopplung des Reinigungsprozesses an einen Fertigungsschritt nachfolgenden Fertigungsschritten vereinzelt oder in einer bestimmten Menge direkt zugeführt werden. Die Reinigung stark verschmutzter Werkstücke in einer dezentralen Waschanlage führt auch zu einer Reduktion des Störstoffeintrages in bestehende zentrale Teilewaschanlagen, wodurch sich die Gesamtpformance der Waschprozesse innerhalb definierter Systemgrenzen erhöhen kann. Zur Erhöhung der Produktivität ist aber auch speziell auf die Schulung des Personals einzugehen, welches unmittelbar mit den Reinigungsaufgaben innerhalb der Fertigungskette betraut wird.

Bei Berücksichtigung der genannten Punkte ist eine wirtschaftliche Integration von dezentralen Waschanlagen in ein bestehendes Reinigungskonzept demnach nur durch eine

produktionslogistische Betrachtung der individuellen Gegebenheiten innerhalb der Fertigungskette möglich.

Neben den dargestellten Arbeiten wurden im Zuge der Projektbearbeitung nachstehende Aufbereitungsverfahren im Rahmen von Labor- und Technikumsversuchen untersucht:

Emulsionsspaltung durch Zugabe eines Demulgators

Die Destabilisierungsversuche durch Zugabe eines externen Demulgators zeigten, dass das Entmischungsverhalten stabiler Emulsionen zur Gewährleistung einer raschen Ölabtrennung erhöht werden kann. Grundsätzlich beruhen Demulgatoren auf der Entladung des hydrophilen Endes der Tenside, auf Verdrängung, auf Wegnahme der Emulgatoren oder auf einer Kombination dieser Mechanismen. Bei der Entladung des hydrophilen Teils der Tenside gibt man gegensätzliche Substanzen zu die sich in weiterer Folge an die Tenside anlagern. Ziel ist es immer, die Ladung bzw. Polarität der Tensidschicht oder der Öltröpfchen aufzuheben um unpolare Tröpfchen und somit eine destabilisierte O/W Emulsion zu erhalten. Die Öltröpfchen können in weiterer Folge leichter agglomerieren und mittels entsprechender Abscheidetechniken aus dem System entfernt werden. Im gegebenen Fall beruht die demulgierende Wirkung des eingesetzten Demulgators auf die Reaktion der kationischen Inhaltsstoffe mit den anionaktiven Substanzen der ins Waschmedium eingetragenen Verunreinigungen.

Emulsionsspaltung durch Zugabe von Polyelektrolyten

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Destabilisierungsversuche mit Polyelektrolytlösungen durchgeführt, die eine kationisch geladene, organisch quaternäre Ammoniumverbindung darstellen. Mit kationischen Polyelektrolyten kann die schwach demulgierende Wirkung eines nichtionischen Tensides verstärkt werden indem die anionischen Ladungen des Waschmediums kompensiert werden. Die daraus erzielbare erhöhte Koaleszenz im Ölscheider kann jedoch zu einem verstärkten Tensidverlust durch Adsorption der Tenside an den freien Ölen führen, wodurch das System durch eine erneute Zugabe von Reinigerprodukten, insbesondere von nichtionischen Tensidkomponenten, ausgeglichen werden muss. Durch diese nachteiligen Eigenschaften bei erhöhter Zugabe des Prozesshilfsmittels ist ein betrieblicher Einsatz nur nach umfangreichen Laborversuchen und der Integration eines Online-Prozessüberwachungssystems zielführend.

Trockenreinigung mittels Druckluftstrahlen & Gleitschleifen und dem Feststoffreiniger Maisgranulat

Auf Basis der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass mit dem Feststoffreiniger Maisspindelgranulat eine Abreinigung von unpolaren Verunreinigungen auf Werkstückoberflächen durchgeführt werden kann.

Die wirtschaftlichen Vorteile der Trockenreinigung mittels Maisspindelgranulat gegenüber nasschemischen Reinigungsverfahren liegen eindeutig in der Reduktion der ansonsten notwendigen Betriebsmittel (VE-Wasser, Reinigungskemikalien, Energie) und der Substitution anfallender und aufzubereitender Abwässer. Bei der ökonomischen aber auch ökologischen Bewertung stellen allerdings die zu entfernenden Prozesshilfsmittel ein entscheidendes Kriterium dar. Diese sollten biologisch abbaubar oder ohne Auflagen in gewöhnlichen Verbrennungsanlagen

thermisch verwertbar sein. Diese thermische Verwertung bietet sich an, da der Brennwert des reinen Maisgranulats mit 17 [MJ/kg] in der Größenordnung von Holzpellets liegt und durch adsorbiertes Öl noch erhöht werden kann.

Sind eine hohe Oberflächenqualität der Werkstücke zu erhalten, so sind das Gleitschleifverfahren und vor allem das Strahlverfahren nur bedingt einsetzbar. Bei zundrigen Teilen kann von einem gewissen Materialabtrag ausgegangen werden, ein Entgratungseffekt war an keinen der beprobten Teile feststellbar. Bei Teilen mit geringer Oberflächenhärte (z.B. Aluminium-Bauteile) muss beim Strahlverfahren mit einer Mattierung der Oberfläche gerechnet werden. Bei Teilen mit hoher Oberflächenhärte kann eine negative Beeinflussung der Oberfläche durch Materialabtrag weitestgehend ausgeschlossen werden. Wie beim Einsatz nasschemischer Reinigungsverfahren muss allerdings auch bei der Trockenreinigung mittels Maisspindelgranulat individuell auf die jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen vor Einsatz des Verfahrens im großtechnischen Maßstab eingegangen werden.

5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

5.1 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung

Die Optimierung von Reinigungsprozessen wird in den nächsten Jahren an Bedeutung zunehmen, da der wirtschaftliche Druck auf Produktionsunternehmen und die Anforderungen an die Reinheit der Werkstücke steigt. Beide Aspekte zusammen erfordern, dass ein grundlegendes Verständnis von möglichst vielen Reinigungstechnologien vorhanden ist. Die Ergebnisse dieses Projektes sollen daher dazu beitragen, dass sich Unternehmen verstärkt mit dem Thema der Oberflächenreinigung auseinandersetzen und die ökonomischen sowie ökologischen Vorteile von Optimierungsmaßnahmen erkennen.

Das Projekt baut auf Ergebnissen früherer Projekte der „Fabrik der Zukunft“ auf. Die genannten Vorläuferprojekte sind als grundlegende Aufbereitung der Thematik „Reinigung“ geeignet, die wissenschaftliche Grundlage darzustellen, auf der aufgebaut werden kann. Dies bezieht sich vor allem auf das Ziel, die Produktion von Gütern und die Bereitstellung von Dienstleistungen in einem solchen Maß zu gewähren, dass der Verbrauch von Ressourcen und die Belastung der Umwelt möglichst weitgehend reduziert werden. Das Projekt selbst kann als Ausweitung der Thematik gesehen werden, aber mit einer stärkeren Fokussierung auf die Umsetzung einer Demonstrationsanlage als bisher.

Die innovative Fortsetzung des Themas ist insofern gegeben, als Reinigung gedanklich bisher weitgehend nicht in den Produktionsprozess integriert war, weil Reinigung kein wertschöpfender Prozessschritt ist. Das Projekt soll wesentlich dazu beitragen, die Reinigung in den Fertigungsprozess zu integrieren und die gleichen Kriterien hinsichtlich Qualität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit angewandt werden, wie für die anderen Teilfertigungsschritte.

Dem Nachhaltigkeitsaspekt wird voll und ganz Rechnung getragen, da das wesentliche Ziel Ressourceneffizienz und Abfallminimierung ist, wobei dies mit neuartigen technischen Lösungen erzielt werden soll. Der effiziente Ressourceneinsatz wird in einem Teilbereich der Produktionskette erzielt, der bisher kaum beachtet wurde und daher in Relation mehr als andere Prozesse zur Umweltbelastung beiträgt. Dies konnte im Zuge der Projektbearbeitung bereits bei der Optimierung von zwei Teilewaschanlagen umgesetzt werden, wobei in einem Fall die Standzeit der Waschbäder um das 5 fache erhöht werden könnte.

5.2 Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Drei Zielgruppen waren direkt Teil des Projektteams: Der Antragsteller ACstyria als österreichischer Autocluster mit rund 180 Partnerbetrieben, die Firma MAP Pamminer als Technologieanbieter und die Wirtschaftspartner als Zielgruppe der produzierenden Gewerbes.

Über das Netzwerk des ACstyria sollen die Projektergebnisse in weiterer Folge durch das Partnermagazin „A Move“ verbreitet und so einer breiten Masse an Unternehmen zum Thema der Oberflächenreinigung sensibilisiert werden.

Durch die Zusammenarbeit von Forschungsgruppen mit unterschiedlichem Hintergrund ergab sich des Weiteren ein Erfahrungs- und Wissensaustausch der zu einem besseren Verständnis der technischen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Problemstellungen in Reinigungsanwendungen führte. So konnten einzelne Problemstellungen auch im Rahmen von Vorlesungen Studenten der Wasserwirtschaft näher gebracht und diese zum Thema der Ressourceneffizienz bei Reinigungsprozessen sensibilisiert werden.

Im Rahmen der Umsetzung der erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen wurden des Weiteren Kontakt zwischen Technologieanbieter und Technologieanwender hergestellt und die Umsetzung wissenschaftlich begleitet und betreut.

5.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potentiale für die Projektergebnisse

Marktpotenzial

Das Marktpotential wird als groß eingeschätzt, weil Reinigungsprozessen im Produktionsablauf generell wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird und daher das Einsparpotential in vielen bestehenden Produktionen groß ist. Im Vergleich zu anderen Prozessen innerhalb der Fertigung sind die Technologien der Reinigungsprozesse nicht dem Stand der Technik angepasst.

Verbreitungs- bzw. Umsetzungspotenzial

Ähnliche Problemstellungen bestehen in vielen anderen Branchen. Genügend Verbreitungspotential ist allein schon innerhalb des Netzwerks des ACstyria gegeben.

Umsetzungspotential

Durch die erfolgreiche Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen an zwei Teilewaschanlagen konnte das Umsetzungspotential bereits nachgewiesen werden. Durch erfolgte und zukünftige Verbreitungsmaßnahmen ist eine weitere Sensibilisierung von Unternehmen innerhalb der Branche zu erwarten.

6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Die Arbeiten am Projekt EFOR führten insbesondere zu nachstehenden Ergebnissen:

- Wirksamer als jede Technologie zur effektiven Abtrennung von Störstoffen aus nasschemischen Reinigungsprozessen ist die Vermeidung des Störstoffeintrages. D.h. bei der Optimierung von Reinigungsprozessen müssen auch vorgelagerte Prozesse innerhalb der Fertigungskette betrachtet werden, um ein optimiertes Zusammenspiel zwischen den eingesetzten Prozesshilfsmitteln, der Prozessführung, der eingesetzten Reinigungstechnologie und der im System integrierten Präventivmaßnahmen zur Störstoffentfernung gewährleisten zu können.
- Ölabscheidersysteme stellen eine kostengünstige Technologie zur Abtrennung von freien Ölen dar und zeichnen sich durch einen geringen anlagentechnischen Aufwand aus. Die Funktionalität von Ölabscheidersystemen wird dabei im Wesentlichen von den herrschenden Wechselbeziehungen zwischen Ölen/Fetten und den demulgierenden Tensiden bestimmt. Nichtionische Tenside besitzen dabei ein höheres Demulgiervermögen als anionische Tenside, wodurch die Entmischung von O/W Emulsionen durch Zugabe reiner Tensidkomponenten (z.B. nichtionisches Spritztensid) erhöht werden kann. Anlagenseitig kann die Abtrennleistung durch Unterstützung des Zusammenfließens kleinerer Öltröpfchen zu größeren Öltröpfchen (Koaleszenz) verbessert werden. Dabei wird der Weg des Aufsteigens der Öltröpfchen durch zusätzliche Einbauten (hydrophobe Platten, Flächen, etc.) vergrößert.
- Die Membranfiltration bietet die Möglichkeit der selektiven Rückgewinnung von Reinigungschemikalien bei gleichzeitiger Abtrennung von Störstoffen. Entscheidend für den effektiven Einsatz der Membranfiltration (Ultrafiltration) ist neben der optimalen Abstimmung aller anlagenspezifischen Faktoren (Anlagengröße, abzutrennende Störstoffe, Membrantyp, etc.) auch die Abstimmung mit dem eingesetzten Reinigersystem. Zweikomponentenreinigersysteme ermöglichen dabei die getrennte Zudosierung von Tensid- und Builderkomponenten, wodurch eine gezielte Zugabe verbrauchter Reinigerbestandteile möglich ist. Dadurch kann die Anreicherung von Buildersubstanzen (Aufsalzung) verhindert und eine den Reinigungsanforderungen gerechte Chemikaliendudosierung durchgeführt werden. Die Aufbereitung von Waschbädern mittels Membranfiltration ist bei Verwendung von Einkomponentenreinigersystemen nur bedingt möglich, da die Nachdosierung von Vollprodukten zu einer Anreicherung von Buildersubstanzen und zu einer irreversiblen Verblockung der eingesetzten Membran führen kann.
- Maisspindelgranulat eignet sich als Feststoffreiniger zur Abreinigung unpolarer Verunreinigungen auf Werkstückoberflächen sofern keine hohen Oberflächenqualitäten gefordert sind. Die wirtschaftlichen Vorteile gegenüber nasschemischen Reinigungsverfahren liegen in der Reduktion der ansonsten notwendigen Betriebsmittel VE-Wasser,

Reinigungschemikalien, Energie und der Substitution anfallender und aufzubereitender Abwässer. Bei Teilen mit hoher Oberflächenhärte kann eine negative Beeinflussung der Oberfläche durch Materialabtrag weitestgehend ausgeschlossen werden. Wie beim Einsatz nasschemischer Reinigungsverfahren muss allerdings auch bei der Trockenreinigung mittels Maisspindelgranulat individuell auf die jeweiligen Gegebenheiten und Anforderungen vor Einsatz des Verfahrens im großtechnischen Maßstab eingegangen werden.

- Demulgatoren und Polyelektrolyte erhöhen das Entmischungsverhalten stabiler Emulsionen und können so zu einer raschen Ölabtrennung beitragen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang allerdings die optimale Abstimmung der Demulgatoren / Polyelektrolyte auf das eingesetzte Reinigungssystem sowie den eingetragenen Ölen und Fetten. Eine Überdosierung kann sich negativ auf die Reinigungsleistung auswirken und zu einem verstärkten Austrag von Reinigungschemikalien führen.
- Für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken in der Automobilindustrie liefert die Überwachung der Reinigungsbäder einen entscheidenden Beitrag. Durch die Bestimmung der Badbelastung und der noch vorhandenen Reinigerkonzentration kann der optimale Zeitpunkt für den Badwechsel ermittelt und Reinigerkomponenten entsprechend des tatsächlichen Verbrauchs zudosiert werden. Für die Kontrolle der Reinigungsleistung stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung, wobei durch Einsatz von inline-Messsystemen konstante Reinigungsqualitäten und Oberflächenreinheiten gewährleistet werden können.

7 Ausblick / Empfehlungen

Im Rahmen des Projektes EFOR wurden eine Vielzahl von Technologien und Optimierungsmaßnahmen evaluiert und im Zuge von Laborversuchen und Versuchen unter realen Betriebsbedingungen untersucht. Die primäre Zielsetzung bestand dabei in der Erbringung des Nachweises, dass Reinigungsprozesse wesentlich ressourcenschonender und damit wirtschaftlicher geführt werden können, wenn diese nicht losgelöst vom Produktionsprozess sondern als integraler Bestandteil der gesamten Fertigungskette betrachtet werden. Neben Ölabscheidersystemen wurde dafür im speziellen die praxisnahe Einsatzfähigkeit der Ultrafiltration zur effektiven Entfernung von Störstoffen aus Reinigungsbädern untersucht. Im Rahmen von Labor- und großtechnischen Versuchen konnte die grundsätzliche Eignung der Ultrafiltration zur effektiven Abtrennung von Störstoffen bei gleichzeitiger Rückgewinnung von Reinigungschemikalien nachgewiesen werden, ein wirtschaftlicher Einsatz von dezentralen Anlagen ist allerdings nur bei entsprechender Anlagengröße, bei entsprechendem Werkstückdurchsatz und optimaler Wartung vorstellbar. Entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz der Membrantechnologie ist neben der Abstimmung der Anlage auf die abzuscheidenden Störstoffe und die Abstimmung zwischen Reinigungsanlage und Reinigungschemikalien daher auch eine eindeutige Zuordnung personeller Verantwortung für den Bereich der Anlagenwartung. In Betrieben mit einer großen Anzahl von Teilewaschanlagen könnte sich die diskontinuierliche Aufbereitung verbrauchter Waschmedien in einer zentralen Anlage als vorteilhaft und kosteneffizienter erweisen. Die Aufbereitung und Wartung der Anlage könnte zentral durchgeführt und der anlagentechnische und personelle Aufwand auf ein Minimum reduziert werden. Grundvoraussetzung für einen effizienten Einsatz ist allerdings ein optimiertes Zusammenspiel zwischen eingesetzter Reinigungschemie, der Maßnahmen zur Überwachung der Reinigungsbäder und –leistung und der ordnungsgemäßen Wartung und Pflege der anlagenseitig integrierten Technologien zur Störstoffentfernung. Diese meist als Ölabscheidersysteme integrierten Präventivmaßnahmen zeigen bei demulgerend eingestellten Reinigersystemen vielfach eine kostengünstige und wartungsarme Möglichkeit zur effektiven Abscheidung der ins System eingetragenen Öle und Fette. Durch Kombination der Ölabscheidersysteme mit einer zentralen Membranfiltrationseinheit könnte in weiterer Folge eine weitgehende Störstoffentfernung unter Einhaltung wirtschaftlicher Vorgaben (Amortisationszeit) realisiert werden.

Wie sich bei der Projektdurchführung gezeigt hat, nimmt die Prozessüberwachung eine zentrale Rolle bei der Erhöhung der Ressourceneffizienz von Waschprozessen ein. Durch die kontinuierliche Überwachung der Badqualität und der erzielbaren Reinigungsleistung können Reinigungschemikalien gezielt nachdosiert und der optimale Zeitpunkt zum Verwerfen der Waschbäder ermittelt werden.

Um die Wirtschaftlichkeit von Reinigungsprozessen zu erhöhen ist daher eine gesamtheitliche Betrachtung von Reinigungsprozessen unumgänglich, wobei bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen individuell auf die jeweiligen betriebs-, prozess- und produktionsspezifischen Gegebenheiten einzugehen ist.

8 Literatur-/ Abbildungs-/ Tabellenverzeichnis

8.1 Literaturverzeichnis

[Abblasen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=131 (Abgerufen 15.04.2009)

[Abkochen, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/100/extern_cat_id/10 (Abgerufen 28.11.2008)

[Absetzbecken, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=174 (Abgerufen, 24.07.2009)

[AG-BREF-Oberflächentechnik, 2002].

AG BREF. Oberflächentechnik. (2002). Entwurf des deutschen Beitrags zu den besten verfügbaren Techniken bei der „Behandlung metallischer und nichtmetallischer Oberflächen mit chemischen und elektrochemischen Verfahren“

<http://www.bvt.umweltbundesamt.de/archiv/oberflaechenbehandlungvonmetallen.pdf> (Abgerufen, 29.01.2009)

[Akay et al., 1993]

Akay, G., & Wakeman, R. (1993). Ultrafiltration and microfiltration of surfactant dispersions - An evaluation of published research. Chemical Engineering Research and Design, 71(A4), 411-420.

[Alkalische Reiniger, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/177/extern_cat_id/15 (Abgerufen 14.12. 2008)

[APP, 2009]

<http://app.gwvfachverlage.de/bauteile/auswahlssystem/verfahren/biologischereinigung/einsatzgebiete.htm> (Abgerufen, 21.02.2009)

[Ax et al., 1999]

Ax, L., Misra, S., & Sköld, R. (1999). Performance and recycling studies of alkaline metal cleaners. Tenside, Surfactants, Detergents, 36(2), 114-121.

[Baker, 2004]

Baker, R. W. (2004). Membrane Technology and Applications. Chichester: Wiley.

[Bennett et Williams, 2004]

Bennett, M. A., & Williams, R. A. (2004). Monitoring the operation of an oil/water separator using impedance tomography. Minerals Engineering, 17(5), 605-614. doi: doi: DOI: 10.1016/j.mineng.2004.01.021.

[Blitzlampenreinigung, 2009].

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/142/extern_cat_id/14 (Abgerufen 15.04.2009)

[Boam, 2003]

Boam, A. (2003). Finest drop coalescer elements promote product recovery. Filtration & Separation, 40(4), 22-25. doi: doi: DOI: 10.1016/S0015-1882(03)80167-2.

[Breuer, 2008]

Breuer, W. (2008). Standzeitverlängerung alkalischer Entfettungsbäder-Waschbäder regenerieren durch Zusatz geringer Zugabe eines Spalters Öl raus = Kosten runter. TechPortal. Publikationen, http://www.techportal.de/de/38/1/publications_public_publications_public_detail/587/ (Abgerufen, 10.08.2009)

[Brunn et al, 1997]

Brunn, K., & Jansen, R. (1997, September). Metallreinigung und -entfettung. <http://www.surtec.com/Publikationen/Entfettung.pdf> (Abgerufen, 08.08.2009)

[Brunn et al., 1998]

Brunn, K., Jansen, R., & Preikschat, P. (1998). Abwasserfreie Abkochentfettung. Galvanotechnik, 89(4), 1119-1124.

[Brunn, 2001]

Brunn, K. (2001). Modulare wässrige Reinigungssysteme – Einsatz in verschiedenen Anwendungsgebieten <http://www.surtec.de/TB/TB03D.pdf> (Abgerufen, 10.05.2008)

[Bürsten, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=123 (Abgerufen 15.04.2009)

[Cheryan et Rajagopalan, 1998]

Cheryan, M., & Rajagopalan, N. (1998). Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. Journal of Membrane Science, 151(1), 13-28. doi: 10.1016/S0376-7388(98)00190-2.

[Chmiel, 2003]

Chmiel, H. (2003, Oktober 30). Verfahren und Vorrichtung zur Emulsionsspaltung-DE10215802A1. <http://www.patent-de.com/20031030/DE10215802A1.html> (Abgerufen, 23.03.2009)

[CKW, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=179 (Abgerufen, 2008)

[CO₂ Pellets Strahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/120/extern_cat_id/11 (Abgerufen 28.07.2009)

[CO₂ Schnee Strahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/119/extern_cat_id/11 (Abgerufen 28.07.2009)

[Cornelis et al., 2005; Goers et al., 2000; Akay et al., 1993]

Cornelis, G., Boussu, K., Van Der Bruggen, B., Devreese, I., & Vandecasteele, C. (2005). Nanofiltration of nonionic surfactants: Effect of the molecular weight cutoff and contact angle on flux behavior. Industrial and Engineering Chemistry Research, 44(20), 7652-7658.

[Dampfentfettung, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/110/extern_cat_id/10 (Abgerufen 28.11.2008)

[Dampfreinigungsstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/118/extern_cat_id/11 (Abgerufen 28.07.2009)

[Demulgierende Reiniger, 2009]

http://www.dentalimpulse-industrie.de/faq/demulgierende_reiniger.html (Abgerufen 27.07.2009)

[Druckflüssigkeitsstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/118/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.07.2009)

[Druckluftstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/116/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.07.2009)

[Druckumfluten, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/107/extern_cat_id/10 (Abgerufen 17.08.2009)

[DWA-Arbeitskreis, 2000]

DWA-Arbeitskreis. (2000). ATV-DVWK-M 765 "Emissionen aus der metallverarbeitenden Industrie, Teil 5: Mechanische Bearbeitung": Merkblatt. Hennef: GFA.

[Elektrochemische Reinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=145 (15.04.2009)

[Fällung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=169 (Abgerufen, Jänner 2009)

[Feuchtstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/118/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.07.2009)

[Flüssiges CO₂, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=187 (15.12. 2008)

[Flotation, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/172/extern_cat_id/16 (Abgerufen, Jänner 2009)

[Frericks et al., 1997]

Frericks, M., Haftka, S., & Heikamp, W. (1997). Feinsttropfenkoaleszenzabscheider aus porösem PE-UHMW. Chemie Ingenieur Technik - CIT, 69(4), 496-499. doi: 10.1002/cite.330690414.

[Fresner et al., 2006]

Fresner, J., Ch. Angerbauer, Dielacher, T., J. Sage, H. Schnitzer, G. Gwehenberger, u. a. (2006). ZERMEG II – Zero emission retrofitting - method for existing galvanising plants. Fabrik der Zukunft. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 22, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

http://www.fabrikderzukunft.at/nw_pdf/0622_zermeg-ii.pdf (Abgerufen, 21.02.2009)

[Gidakos et al., 1989]

Gidakos, E., Köhling, A., & Schmitt, R. (1989). Entsorgung von Öl-in-Wasser-Emulsionen durch Elektrokoagulation. *Chemie Ingenieur Technik*, 61(6), 443-448. doi: 10.1002/cite.330610603.

[Gräf, 1998]

Gräf, R. (1998). Taschenbuch Der Abwassertechnik: Umwelttechnik in der Oberflächenveredelung; Stand der Technik und praktische Umsetzung. München ; Wien: Hanser.

[Gleitschleifen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=200 (Abgerufen 15.04.2009)

[Heusch, 2002]

Heusch, R. (2002). Emulsions. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Electronic Release (7. Aufl.). Weinheim: Wiley InterScience.

http://mrw.interscience.wiley.com/emrw/9783527306732/ueic/article/a09_297/current/abstract?hd=All.emulsions&hd=All.Heusch (Abgerufen, 11.08.2009)

[Hlavacek, 1995]

Hlavacek, M. (1995). Break-up of oil-in-water emulsions induced by permeation through a microfiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 102, 1-7. doi: 10.1016/0376-7388(94)00192-2.

[Hoffmann et Nitsch, 2000]

Hoffmann, S., & Nitsch, W. (2000). Membrankoaleszierer zur Phasenseparation von tensidisch stabilisierten und feinstdispersen Öl-in-Wasser-Emulsionen. *Chemie Ingenieur Technik*, 72(1-2), 73-78. doi: 10.1002/1522-2640(200001)72:1/2<73::AID-CITE73>3.0.CO;2-4.

[Hong et al., 2003, (11), (12), (13)]

Hong, A., Fane, A. G., & Burford, R. (2003). Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions. *Journal of Membrane Science*, 222(1-2), 19-39. doi: 10.1016/S0376-7388(03)00137-6.

[Ivanov et Kralchevsky, 1997]

Ivanov, I. B., & Kralchevsky, P. A. (1997). Stability of emulsions under equilibrium and dynamic conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 128(1-3), 155-175. doi: 10.1016/S0927-7757(96)03903-9.

[Jelinek et al., 1999]

Jelinek, T. W., Adams, H., K. Gerstenberg, T. Oberauer, J. Spouwen, & K. Wittel. (1999). Reinigen Und Entfetten in Der Metallindustrie: mit 42 Tabellen. Saalgau/Württ: Leuze.

[Jönsson et Jönsson, 1993 zitiert von Cornelis et al., 2005]

Johannes Gillar. (1994). Ökologisch unbedenklich. Abwassertechnik: Standzeit der Bäder verlängern. *Industrieanzeiger*, 116(26), 44-45.

[Kaya et al., 2009]

Kaya, Y., Barlas, H., & Arayici, S. (2009). Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) wastewater in a detergent plant: Effects of pH, temperature and transmembrane pressure on flux behavior. *Separation and Purification Technology*, 65(2), 117-129. doi: 10.1016/j.seppur.2008.10.034.

[Kosswig, 2002]

Kosswig, K. (2002). Surfactants. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH.

http://ftubhan.tugraz.at/han/WILEY-351001/mrw.interscience.wiley.com/emrw/9783527306732/ueic/article/a25_747/current/html?hd=All,critical&hd=All,micell&hd=All,concentration (Abgerufen, 09.03.2009)

[Krotscheck et al., 2003]

Krotscheck, C., Nievoll, R., & Kromus, S. (2003). Gewinnung von adsorptiven Produkten aus Maisreststoffen. *Fabrik der Zukunft. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 22*, Wien: Kornberg Institut, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/0322_maisreststoffe.pdf (Abgerufen, 10.08.2009)

[Kramer, 25.06.2009]

<http://www.kramerindustriesonline.com/tumbling-media/corn-cob.htm> (Abgerufen, 25.06.2009)

[Kramer, 26.06.2009]

<http://www.kramerindustriesonline.com/blasting-media/corn-cob.htm> (Abgerufen, 26.6.2009).

[Kramer, 10.08.2009]

<http://www.kramerindustriesonline.com/tumbling-media.htm> (Abgerufen, 10.08.2009)

[Kunz, 1996]

Kunz, D. P. (1996, Juni). Reststoffvermeidung durch ein biologisches Entfettungsspülbad in einer Feuerverzinkerei .

http://www.gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18350/ABAG/1996_006_Entfettungsspuelbad.pdf (Abgerufen, 21.02.2009)

[KW, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=180 (Abgerufen, 2008)

[Landl, 1993]

Landl, K. (1993). Beschreibung und Bewertung von wäßrig-alkalischen Entfettungs- und Reinigungssystemen in der metallverarbeitenden Industrie. Diplom-Arbeit, Techn. Univ. Graz.

[Lyko et al., 1994]

Lyko, M., Eckstein, B., & Wassenberg, B. (1994). Tensidrückgewinnung mit Membrantrenntechniken. Entsorgungspraxis, 12(6), 44-46.

[Maisspindelgranulat, 25.06.2009]

<http://www.maisspindelgranulat.de> (Abgerufen, 25.6.2009)

[Maisspindelgranulat, 2009]

<http://www.maisspindelgranulat.de> (Abgerufen, 06.07. 2009)

[Melin et Rautenbach, 2004]

Melin, T., & Rautenbach, R. (2004). Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung (2. Aufl.). Berlin [u.a.]: Springer.

[Metallreiniger, 2009]

<http://www.metallreiniger.de/PRODUKTE/UNICLEAN.HTM> (Abgerufen, Jänner 2009)

[Möser Verfahrenstechnik]

Möser Verfahrenstechnik, D-63179 Obertshausen, Technische Information 15: Recycling Entfettungsbad

[N.N., ACS liquid-liquid coaleszer design manual, 2009]

<http://people.clarkson.edu/~wilcox/Design/coalesc.pdf> (Abgerufen, 29.05.2009)

[N.N., ACS liquid-liquid..., 2003]

N.N. (Stand 2003, Juli 30). ACS liquid-liquid coaleszer design manual. pdf-manual der Firma ACS Industries,

<http://people.clarkson.edu/~wilcox/Design/coalesc.pdf> (Abgerufen, 29.05.2009)

[N.N., Wenn die Chemie..., 2005]

N.N. (2005, Oktober 4). Wenn die Chemie stimmt, wird das Reinigen von Metall zu einem effizienten Prozess. industrie.de - Das Fachportal für Wirtschaft und Technik - Fachartikel. Betrieb & Meister | Ausgabe: 2005/009

http://www.industrie.de/industrie/live/index2.php?menu=1&submenu=3&object_id=30476490

(Abgerufen 08.08.2009)

[Nassdruckluftstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/118/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.7.2009)

[Neuper et al., 2004]

Neuper R., Mayrhuber F., Krammer G., Aichinger G. (Herbst 2004), Skriptum: Mechanische Verfahrenstechnik, AMFT Instituts an der TU Graz, 2004

[Neutralreiniger, 2008]

www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/176/extern_cat_id/15, (Abgerufen 14.12.2008)

[Oberfläche, 2009]

<http://www.offset-druck-farben.de/download/skobflsp.pdf> (Abgerufen, 2009)

[Oilandwater, 2009]

<http://www.oilandwaterseparator.com/faq.html#1> (Abgerufen, 27.05.2009).

[Penth, 1991]

Penth, E. (1991, August 14). Verfahren zum Spalten von Emulsionen-DE4003737A1. <http://www.patent-de.com/19910814/DE4003737A1.html> (Abgerufen, 14.03.2009)

[Planasch, 2003]

Planasch, M. (2003). Implementierung wasserschonender und wasservermeidender Technologien in der Oberflächenbehandelnden Industrie mit Schwerpunkt auf Eloxalunternehmen. Diplom-Arbeit, Techn. Univ. Graz.

[Pflanzenölbasierte Reiniger, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/182/extern_cat_id/15, (Abgerufen, 2008)

[Plasmareinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=143 (Abgerufen 14.04.2009)

[Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=187 (Abgerufen 13.04.2009)

[Reinigen mit überkritischen CO₂, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=147 (Abgerufen 13.04.2009)

[Robinson et Falk, 2000]

Robinson, P., & Falk, H. (2000). Mit Hilfe der Schwerkraft. Koaleszenzabscheider zur Trennung von Dispersionen. CAV - Chemie-Anlagen + Verfahren, 33(12), 56-57.

[Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=181 (Abgerufen, 2008)

[Saure Reiniger, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/178/extern_cat_id/15, 15.12. 2008)

[Säurespaltung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/169/extern_cat_id/16 (Abgerufen, 2009)

[Schebek et al., 1994]

Schebek, L., Fink, P., & Roos, C. (1994). Lösemittel aus der Oberflächenreinigung, Metall- und Elektrobranche. Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren. im Auftrag der ABAG-Abfallberatungsagentur Baden Württemberg, Fellbach: Lahmeyer International GmbH.
http://www.gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18350/ABAG/1994_005_Loesemittel_aus_Oberflaechenreinigung_Metall_Elektrobranche.pdf (Abgerufen, 12.08.2009)

[Schlammstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/118/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.07.2009)

[Schleifkörper, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=189 (Abgerufen, 30.03.2009)

[Schleudern, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=124 (Abgerufen 15.04.2009)

[Schleuderstrahlen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/117/extern_cat_id/11 (Abgerufen 27.07.2009)

[Schwerkraftverfahren, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=174 (Abgerufen, 2009)

[Sita, 2009]

<http://www.sitamesstechnik.de> (Abgerufen, 2009)

[Skimmer, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=174 (Abgerufen, Jänner 2009)

[Sokolovic et al., 2009]

Sokolovic, R. S., Sokolovic, S., & Sevic, S. (2009). Oily water treatment using a new steady-state fiber-bedcoalescer. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 410-415. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.054.

[Spritzreinigung, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/106/extern_cat_id/10 (Abgerufen 11.11. 2008)

[Stache et al., 1979]

Stache, H. (1979). *Tensid-Taschenbuch*. München ; Wien: Hanser.

[Stewart et Arnold, 2008]

Stewart, M., & Arnold, K. (2008). *Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting*. Gulf Professional Publishing.

[Strahlreinigungsmittel, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=198 (Abgerufen, 06.07.2009)

[Surtec, 2009]

Aufbereitung eines wässrigen Reinigers mittels MF/UF-Modul

<http://www.surtec.com/TB/TB13aD.pdf> (Abgerufen 15.8.2009)

[Tauchreinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/92/extern_cat_id/10 (Abgerufen 17.04.2009)

[Tigres, 2005]

TIGRES-Publikation 1: Netzung, Oberflächenenergie und YOUNG'sche Gleichung, (Stand 2005, Juli 4)

http://www.tigres.de/image/tigres-publikation_01_netzung_oberflchenenergie_und_youn.pdf?PHPSESSID=1a7e96d3548736acc13469f95f71adda (Abgerufen, 24.03.2009)

[Tir et al., 2008]

Tir, M., & Moulai-Mostefa, N. (2008). Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. Journal of Hazardous Materials, 158(1), 107-115. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.051.

[Trommelreinigung, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/111/extern_cat_id/10 (Abgerufen 28.11.2008)

[Überlaufrinnen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=174 (Abgerufen, Jänner 2009)

[Ultraschallreinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/114/extern_cat_id/10 (Abgerufen 16.04.2009)

[Urbanski et al., 2002]

Urbanski, R., Góralaska, E., Bart, H., & Szymanowski, J. (2002). Ultrafiltration of Surfactant Solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 253(2), 419-426. doi: 10.1006/jcis.2002.8539.

[UV-Licht Reinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/141/extern_cat_id/14 (Abgerufen 15.04.2009)

[UV-Licht Oxidation, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/169/extern_cat_id/16 (Abgerufen, Jänner 2009)

[Vakuumentölen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=148 (Abgerufen 15.04.2009)

[Van den Broek et Van der Zande, 1998]

Van den Broek & Van der Zande, Comparison of plate separator, centrifuge and hydrocyclone, SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition Beijing, China, 2–6 November (1998)
Zitiert bei Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (o. J.). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Journal of Hazardous Materials, In Press, Corrected Proof. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.

[Vauk et Müller, 2000]

Vauck, W. R. A., & Müller, H. A. (2000). Grundoperationen Chemischer Verfahrenstechnik (11. Aufl.). Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.

[Verdampfung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/170/extern_cat_id/16 (Abgerufen, Februar 2009)

[Vibrationsreinigung, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/index.php?module=wissensspeicher&func=display_article&extern_article_id=126 (Abgerufen 15.04.2009)

[Völler, 1999]

Völler, Nicole (1999) Henkel KgaA, Düsseldorf, Neutralreiniger der neuen Generation, JOT 11/1999, Zitiert von Fresner et al., 2006

[Wasser-Kohlenwasserstoff-Emulsion, 2008]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/183/extern_cat_id/15 (Abgerufen, 2008)

[Wines et Brown, 1997]

Wines, T. H., & Brown, R. L. (1997). Difficult liquid-liquid separations. Chemical Engineering, 104-109.

<http://www.pall.com/pdf/CE1297.pdf> (Abgerufen, 12.08.2009)

[Zentrifugen, 2009]

http://www.bauteilreinigung.de/Wissensspeicher/display_article/extern_article_id/174/extern_cat_id/16 (Abgerufen, 2009)

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensschema Crossflow-Mikrofiltrationsanlage mit periodischer Rückspülvorrichtung.....	24
Abbildung 2: Verfahrensschema der mobilen Membran-Versuchsanlage (Technikumsanlage) .	25
Abbildung 3: Pilotanlage – Membranfiltrationsversuche unter realen Betriebsbedingungen	25
Abbildung 4: Ölabscheidersystem nach Verfahrensanpassung (Teilewaschanlage 1).....	29
Abbildung 5: Ölabscheidersystem nach Verfahrensanpassung (Teilewaschanlage 2).....	30
Abbildung 9: Gesichtspunkte zur Prozessoptimierung	38
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Reinigungskraft.....	75
Abbildung 11: Wirkungsweise wässriger Reiniger [Brunn et al, 1997].....	78
Abbildung 12: Unterschied zwischen emulgierenden (1.stes und 3.tes Gefäß) und demulgierenden (2.tes und 4.tes Gefäß) Reinigern nach einer Minute Standzeit [Demulgierende Reiniger, 2009]	79
Abbildung 13: Oberflächenspannungsverläufe des Wassers ohne und mit Salz abhängig von der Tensid-Konzentration a.) nicht-ionisches Tensid (Dodecylheptaglycol- Ether) in Wasser; b.) ionisches Tensid (Dodecyl Sulfat) in Wasser; c.) Tensid von b.) in 0,1 N NaCl-Lösung [Kosswig, 2002]	81
Abbildung 14: Synergieeffekte von Builder und Tenside [Brunn et al, 1997].....	83
Abbildung 15: Schleifkörperformen [Schleifkörperformen, 2009].....	89
Abbildung 16: Bestandteile der Maiskolbens [Maisspindelgranulat, 25.06.2009].....	91
Abbildung 17: Aufbereitungsverfahren bei wässrigen Systemen (blau: physikalische Verfahren; rot: chemische Verfahren; grün: biologische Verfahren).....	91
Abbildung 18: Absetzbecken [Absetzbecken, 2009].....	96
Abbildung 19: Wirkungsweise eines Koalisierfilters [Wines et Brown, 1997].....	101
Abbildung 20: Prozessschema vor (links) und nach (rechts) der Umstellung [Kunz, 1997].....	107
Abbildung 21: Überblick einiger Membranverfahren, Einteilung [Möser Verfahrenstechnik]....	109
Abbildung 22: Unterschiedliche Benetzung eines Tropfens auf der Feststoffoberfläche [Oberfläche, 2009].....	116
Abbildung 23: Vereinfachtes Jablonski-Diagramm [Sita, 2009].....	116

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vor- und Nachteile der Ultraschallreinigung	62
Tabelle 2:	Tauchreinigung vs. Spritzreinigung	64
Tabelle 3:	Vor- und Nachteile des Gleitschleifens.....	68
Tabelle 4:	Vor- und Nachteile bei Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid (CO ₂)	72
Tabelle 5:	Vor- und Nachteile der Plasmareinigung.....	74
Tabelle 6:	Eigenschaften flüssiger Reiniger	77
Tabelle 7:	Überblick über Membranverfahren [Melin et Rautenbach, 2004; Planasch, 2003]...	108
Tabelle 8:	Vor- und Nachteile anorganischer Membranen [Melin et Rautenbach, 2004].....	110
Tabelle 9:	Membranmodule [Melin et Rautenbach, 2004]	111

9 Anhang

Nachstehende Ausführungen sollen einen Überblick über gängige Reinigungsverfahren, Reinigungschemikalien, Aufbereitungsverfahren und Maßnahmen zur kontinuierlichen Überwachung von Reinigungsbädern und der Reinigungsleistung schaffen. Diese Darstellungen nach dem Stand der Technik sollen als Leitfaden und Orientierungshilfe eine wertvolle Hilfestellung bei der Lösung von Problemstellungen im Bereich der Reinigung von metallischen Oberflächen liefern, wobei nachstehende Punkte näher erläutert wurden:

Kapitel 9.1 - Nasschemische Reinigungsverfahren

Kapitel 9.2 - Mechanische Reinigungsverfahren

Kapitel 9.3 - Strahlverfahren

Kapitel 9.3 - Sonderverfahren der Bauteilreinigung

Kapitel 9.5 - Flüssige - Reiniger

Kapitel 9.6 - Feststoff – Reiniger

Kapitel 9.7 - Technologien zur Waschbadaufbereitung / Störstoffentfernung

Kapitel 9.8 - Kontinuierliche Überwachung der Reinigungsbäder und -leistung

9.1 Nasschemische Reinigungsverfahren

9.1.1 Ultraschallreinigung

Die Ultraschallreinigung basiert auf dem Prinzip der Kavitation. Die Schallwellen erzeugen einen Druckunterschied, wodurch sich an der Oberfläche und an den Verschmutzungen Kavitationsbläschen bilden und bei Druckanstieg wieder implodieren. Bei der Implosion ergeben sich Aufschlagdrücke von ca. 1000 [bar], wodurch die Verunreinigungen vom Bauteil gesprengt und in der Flüssigkeit dispergiert werden. Die Schallwellen bewirken ebenso eine ständige Heranführung frischen Reinigers an die Bauteiloberfläche.

Mit Hilfe der Frequenz kann die Blasengröße gesteuert werden: Bei niedriger Frequenz (großer Schwingungsamplitude) entstehen große Bläschen, womit große Bauteile mit viel Schmutz gereinigt werden. Eine hohe Frequenz (kleine Amplitude) führt hingegen zu kleinen Bläschen. Dies ist ideal für kleine, empfindliche Bauteile mit leichter Verschmutzung. Damit es zur Kavitation kommt, muss der Reiniger entgast werden. Ansonsten bilden sich Gasblasen, die im Gegensatz zu den erwünschten Dampfbläschen weniger stark oder gar nicht implodieren. Die Entgasung der Flüssigkeit wird entweder durch Anlegen eines Unterdrucks in einem geschlossenen Behälter, oder durch Beschallung der Flüssigkeit mit Ultraschall vor dem Eintauchen des Werkstückes erreicht.

Die Reinigung in einem Unterdruck-Behälter hat den Vorteil, dass kleinere Schallwellen bei geringeren Energieeinsatz benötigt werden, und dass es dadurch zur Absaugung von Luft aus Bauteil-Hohlräumen (die eine Art „Taucherglocke“ bilden) kommen kann.

Vorteile	Nachteile
auch bei komplizierten Bauteilen und Bohrungen anwendbar	Hinterschneidungen nur schwer zu reinigen (Probleme überall dort, wo die Schallwellen nicht hingelangen)
gründliche Reinigung	
schonende Reinigung	Spülung und Trocknung nach Reinigung nötig
preiswertes Verfahren	

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Ultraschallreinigung

Mittels Ultraschall werden meist Teile der Feinmechanik, medizinische Instrumente, Linsen, Brillengläser, Schmuck aber auch zu galvanisierenden Bauteile gereinigt. Es werden Anlagen mit Waschbecken von einigen Litern bis mehreren 1000 Liter angeboten.

Die Ultraschallreinigung ist mit jedem flüssigen Reiniger, wässrig wie auch organisch kombinierbar, und entfernt auch nicht im Reiniger lösliche Verschmutzungen vom Bauteil [Ultraschallreinigung, 2009].

9.1.2 Druckumfluten

Beim Druckumfluten wird die Badflüssigkeit angesaugt und an meist mehreren anderen Stellen über Düsen mit 8 bis 9 [bar] wieder ins Bad gedrückt, wodurch eine Strömung mit hohen Geschwindigkeiten um das getauchte Bauteil erzeugt wird. Es kommt zu Strömungsabrissen, Turbulenzen und bei sehr hohen Umströmungs-Geschwindigkeiten zu Kavitationsbläschen. In diesem Fall wird ein ähnlicher Reinigungseffekt wie bei der Ultraschallreinigung erzielt. Da hohe Geschwindigkeiten nach Bernoulli einen niedrigeren Druck bedeuten, entsteht eine Sogwirkung auf die stehende Lösung in Sack-Löchern und Bohrungen des Bauteils oder anderen Strömungstotgebieten. Somit wird auch der Schmutz von dort ausgetragen. Als weiterer Vorteil ist das Ausbleiben eines Ölfilms zu nennen, der die Bauteile bei Herausnehmen verschmutzen würde.

Dieses Verfahren eignet sich besonders gut zur Reinigung von Rohrbündeln, oder Rohren mit kleineren Durchmessern. Sehr leichte Bauteile werden allerdings mit der Strömung mitgerissen, und müssen daher auf anderem Wege gereinigt werden. Sonst kann das Druckumfluten überall dort eingesetzt werden, wo auch die Tauchreinigung angewandt wird, wobei beim Druckumfluten mit einer kürzeren Reinigungsdauer gerechnet werden kann.

Hinsichtlich der Wahl des flüssigen Reinigers gibt es keine Einschränkung für das Druckumfluten. Zu unterscheiden ist das Druckumfluten vom Fluten. Hierbei wird einfach ein leeres Becken mit Reiniger gefüllt, in dem sich das Bauteil befindet. Die erzeugte Bewegung des Bades verbessert wiederum das Lösen und Emulgieren der Verunreinigungen. Ansonsten ist das Fluten der Tauchreinigung ähnlich [Druckumfluten, 2009].

9.1.3 Tauchreinigung

Bei diesem Verfahren werden die Bauteile in ein Reinigungsbad getaucht. Die Verschmutzungen werden hierbei vornehmlich durch die chemische Wirkung des Reinigers entfernt. Wenn diese nicht ausreicht (vor allem bei gering löslichen Verschmutzungen, wie bei wässrigen Reinigern und

hydrophoben Schmutz), können folgende mechanische Maßnahmen eine Verbesserung der Reinigungsleistung bewirken:

- Bewegung des Bauteils bzw. des Korbes mit den Teilen (oszillierend oder rotierend)
- Presslufteintrag
- Badumwälzung
- Ultraschall

Mit zunehmender Badstandzeit bildet sich an der Wasseroberfläche ein Ölfilm, der das Bauteil beim Herausziehen aus der Flüssigkeit wieder verschmutzen kann. Dies kann durch einen rechtzeitigen Neuansatz des Bades vermieden werden. Die Badstandzeit kann durch Badaufbereitungsmaßnahmen verlängert und somit die Wirtschaftlichkeit sowie die Reinigungsqualität erhöht werden. Um Rückstandsfreiheit zu gewährleisten, sollte das Bauteil nach dem Tauchen gespült werden. Oft ist auch ein Trockenschritt erwünscht.

Bei höheren Badtemperaturen verläuft die Reinigung wegen des gesteigerten Lösevermögens sowie der höheren Viskosität besser. Bei brennbaren Lösemittel- Reinigern ist die Temperatur aber aus Sicherheitsgründen begrenzt.

Die Tauchreinigung wird meist bei leichten bis mittelschweren Verunreinigungen und bei kleinen Bauteilen in Körben eingesetzt. Größere Teile müssen einzeln eingetaucht werden. Auch für kompliziert geformte Bauteile mit Bohrungen findet dieses Verfahren seine Anwendung. Man kann die Tauchreinigung leicht auf geänderte Anforderungen anpassen, in dem man beispielsweise ein weiteres Tauchbecken anschließt oder einen Ultraschall-Erzeuger ins Becken hängt. Bei großflächigen Bauteilen mit fest anhaftendem Schmutz wird hingegen in der Regel mittels Spritzreinigungsverfahren gewaschen.

Hinsichtlich des Bauteilwerkstoffs gibt es seitens der verwendeten Reiniger Einschränkungen, das Verfahren an sich schließt keine Materialien aus. Ebenso sind sämtliche flüssige Reiniger für die Tauchreinigung einsetzbar, Sicherheitsauflagen sind aber gegebenenfalls zu beachten [Tauchreinigung, 2009].

9.1.4 Spritzreinigung

Bei der Spritzreinigung werden die Verschmutzungen durch die Kombination von Reiniger und mechanischer Kraft des auftreffenden, flüssigen Strahles von der Oberfläche gelöst. Es wird so eine Schwemmwirkung erreicht, die es ermöglicht dicke Schmutzschichten schnell zu entfernen. Die Reinigungsflüssigkeit wird dabei je nach Anwendungsfall mit bis zu 20 [bar] durch die Düsen gedrückt. In der Regel folgen nach dem Spritzreinigen ein Spül- und danach ein Trockenschritt. Bei beweglichen Spritzsystemen kann die Anordnung der Düsen an das Bauteil angepasst werden, wodurch dieses Verfahren ebenso für Sacklöcher und Hohlräume gut geeignet ist.

Tauchreinigung vs. Spritzreinigung		
Anwendungsfall	Vorteil Tauchreinigung	Vorteil Spritzreinigung
hohe Temperaturen	energetisch besser, da weniger Wärmeverluste	
hohe Stückzahlen		schneller als Tauchreinigung
fest haftende Verunreinigungen		bessere Reinigung
große Werkstücke		keine großen, teuren Tauchbecken notwendig

Tabelle 2: Tauchreinigung vs. Spritzreinigung

Hauptsächlich wird die Spritzreinigung bei wässrigen Reinigern eingesetzt. Bei alkalischen und sauren Reiniger ist das Personal vor einer Kontaktierung zu schützen, wobei auf den entstehenden Nebel ebenso zu achten ist (siehe Kapitel „Wässrige Reiniger“). Hingegen sind Neutral-Reiniger gefahrlos und hinsichtlich des Arbeitsschutzes unbedenklich. CKW's dürfen nur bei geschlossenen Anlagen verwendet werden. Brennbare Lösungsmittel, wie Kohlenwasserstoffe, werden nur in Sonderfällen aufgrund einer erhöhten Brand- und Explosionsgefahr bei Drücken unter 125 [mbar] eingesetzt.

Die Spritzreinigung kommt in verschiedenen Anlagensystemen zum Einsatz. Man unterscheidet neben manuellen Spritzbecken, zwischen Einkammer-, Mehrkammer- und Durchlaufsystemen.

Manuelle Spritzbecken (handgeführte Spritzpistolen über einem Becken) werden allerdings nur bei unregelmäßigen und geringen Reinigungsbedarf angewandt.

In Einkammersystemen wird in nur einer Waschkammer automatisch abgespritzt, gespült und getrocknet. Sie sind deswegen bei einer diskontinuierlichen Betriebsweise und bei geringen und unregelmäßigen Reinigungsbedarf geeignet. Ein Abblasen nach jedem Waschschrift zur Vermeidung der Verschleppung ist empfehlenswert und bei einem Druckluftanschluss an das Düsensystem meist einfach realisierbar. Der Vorteil dieses Systems liegt in der meist einfachen und kostengünstigen Bauweise.

Bei Mehrkammersystemen laufen die verschiedenen Vorgänge zeitlich getaktet in mehreren Schritten ab. Die Anzahl der Kammern hängt dabei von der zu entfernenden Menge und Art an Verunreinigung ab. Das System ist für hohen Durchsatz geeignet. Je nach Geometrie unterscheidet man weiter zwischen Karussell-Anlagen, in denen die Taktung durch eine Drehbewegung um eine Achse erfolgt, und zwischen Umsetzer-Anlagen. In letzteren wird das Werkstück meist linear von einer Kammer in die nächste umgesetzt.

Durchlaufsysteme können kontinuierlich oder getaktet betrieben werden. Die Reinigungsabschnitte sind dabei meistens durch Hubtüren getrennt. Sie eignen sich für große Stückzahlen und sind besonders gut in den Fertigungsprozess integrierbar [Spritzreinigung, 2008].

9.1.5 Trommelreinigung

Die Bauteile werden in umlaufenden Trommeln gereinigt. Durch die Umwälzbewegung entsteht eine bessere Durchmischung der Schüttgüter. Man unterscheidet zwei Nassverfahren: Erstens tauchen die Teile in ein Bad ein oder zweitens werden sie abgespritzt. Beim Tauchverfahren wird durch die Bewegung ein ständig frisches Waschmedium an die Bauteiloberfläche herangetragen.

Es kann durch Ultraschall oder Druckumfluten noch verbessert werden. Das Spritzverfahren ist auch für hartnäckige Verschmutzungen geeignet. Die Trommelreinigung kommt zumeist bei Kleinteilen im Chargenbetrieb zur Anwendung [Trommelreinigung, 2008].

9.1.6 Bürstenreinigung mit Reinigungsmittel

Für die Reinigung sind das Lösevermögen des Reinigers und die mechanische und abrasive Wirkung der Bürste verantwortlich. Durch die Bewegung der Borsten werden zudem die gelösten Verunreinigungen entfernt und frischer Reiniger zugeführt.

Je nach Anwendungsfall verwendet man verschieden harte Bürsten, wobei die Borsten nicht härter als die Bauteiloberfläche sein sollten. Die Bürstreinigung kommt zum Entfernen festhaftender Verunreinigungen wie Zunder oder alte Farben zum Einsatz (harte Bürsten), oder nur zur Beschleunigung des Lösevorganges (weiche Bürsten). Bänder, flächige Bauteile, und Profile können im Durchlaufverfahren gereinigt werden. Ansonsten wird die Bürstreinigung bei Rohren, Flaschen, Autowaschanlagen und vielen anderem angewandt.

9.1.7 Abkochen

Beim Abkoch-Verfahren wird das Bauteil in einen Behälter mit kochendem Reiniger getaucht. Dabei handelt es sich meist um nicht- oder chlorierte Kohlenwasserstoffreiniger, und nur selten um wässrige Reiniger. Durch die hohe Temperatur lösen sich Verschmutzungen wie Wachse, Öle und Fette schneller, die Dampfblasen sorgen für Turbulenz und eine gute Vermischung, sodass auch Späne und Staub von der Oberfläche entfernt werden können.

Da das Bauteil beim Herausheben durch den sich an der Oberfläche bildenden Fettfilm wieder verunreinigt wird, dient das Verfahren als Vorreinigung. Zumeist wird es als Vorstufe zum Dampfentfetten verwendet, da dort siedender Reiniger benötigt wird, ansonsten ist es meist zu energieintensiv. Zudem müssen die Bauteile schnelle Temperaturwechsel aushalten, da sie nicht immer vorgewärmt bzw. langsam abgekühlt werden können [Abkochen, 2008].

9.1.8 Dampfentfettung

Das Bauteil wird hier in einem Lösungsmittel-Dampfraum gehängt, worauf das Lösemittel am Bauteil kondensiert, dabei die Verunreinigungen löst und schließlich mit ihnen vom Bauteil in den Siedesumpf tropft. Von dort verdampft nur das Lösungsmittel wieder, aufgrund des niedrigen Siedepunkts, während die Verunreinigungen im Sumpf verbleiben. Da der Lösemitteldampf schwerer als Luft ist, sammelt er sich direkt oberhalb des Sumpfes. Der Reinigungsprozess endet spätestens dann, wenn das Bauteil dieselbe Temperatur wie der Dampf angenommen hat. Für stark verschmutzte Bauteile, geometrisch komplizierte (Bohrungen, Spalten), oder Bauteilen mit geringer Wärmekapazität wird dieses Ende oft zu früh vor ausreichender Reinigung erreicht. Dann wird dem Verfahren zur Unterstützung mit einem weiteren, wie der Tauchreinigung, Spritzreinigung oder dem Abkoch-Verfahren kombiniert.

Es können mittels Dampfentfetten nicht nur die im Lösemittel löslichen Verunreinigungen, wie Öle und Fette entfernt werden, sondern auch an diese gebundene feste Verschmutzungen, wie z.B. Staub und Späne. Sehr hohe Reinheiten sind erzielbar. Nach der Reinigung verbleiben rückstandsfreie Flächen, da das Lösungsmittel keine Tenside oder Verschmutzungen enthält,

welche am Bauteil anhaften könnten, und das Lösemittel in der Regel durch die hohe angenommene Temperatur des Bauteils von selbst verdampft.

Die Kosten für eine Dampfentfettungsanlage hängen stark vom verwendeten Reiniger ab, die unterschiedliche Sicherheitsvorkehrungen erfordern. Deswegen verwendet man meistens CKW, die zwar wegen Emissionen eine geschlossene Anlage erfordern, aber keine besonderen Brand- oder Explosions-Schutzmaßnahmen, wie es bei den nicht-chlorierten Kohlenwasserstoff-Reinigern der Fall ist. Wässrige Reiniger oder Pflanzenölester können nicht eingesetzt werden.

Lösemittel mit möglichst niedrigem Siedepunkt empfehlen sich, da dadurch weniger Energie zur Verdampfung benötigt wird. Ein Aufbereitungsverfahren für das Lösemittel wird nicht benötigt, da nur das Lösemittel verdampft (bei ausreichender Siedepunktdifferenz zu den Verunreinigungen). Es gibt sowohl offene wie auch geschlossene Anlagen, Durchlaufverfahren sind möglich [Dampfentfettung, 2008].

9.2 Mechanische Reinigungsverfahren

9.2.1 Vibrationsreinigung

Bei der Vibrationsreinigung handelt es sich um ein sehr junges Verfahren, das erst 1996 zum Patent angemeldet wurde. Es dient zur Vorreinigung oder zur Reinigung zwischen einzelnen mechanischen Bearbeitungsschritten. Die Bauteile werden zum Schwingen gebracht, wodurch Flüssigkeiten und Späne ihre Haftkräfte zum Bauteil überwinden und sich von diesem lösen. Die Verunreinigungen sammeln sich an den Schwingknoten und können dort abgesaugt/abgeblasen werden. Derzeit beschränkt sich die Anwendbarkeit auf einfache rotationssymmetrische Teile ohne Hohlräume, wie Zahnräder. Bei kubischen oder komplizierter geformten Teilen ist die Schwingungsfrequenz nur schwierig zu bestimmen, aber es wird daran gearbeitet. Als Vorteile bei der Anwendung der Vibrationsreinigung sind zu nennen [Vibrationsreinigung, 2009]:

- Höhere Wirtschaftlichkeit als herkömmliches Abblasen
- Wirkungsgrad von 95-98% bei flüssigen Verunreinigungen
- Kurze Reinigungsdauer von etwa 10 Sekunden
- Weiterverwendung der rückgewonnenen Bearbeitungshilfsstoffe möglich
- Hohe Umweltverträglichkeit

9.2.2 Bürsten

Hierbei ist die trockene Reinigung mittels Bürsten gemeint, die Bürstreinigung mit Reinigungsmitteln wird bei den Nassreinigungsverfahren genauer beschrieben. Die Verunreinigungen werden durch mechanisches Abstreifen bzw. Abschleifen entfernt, wobei es bei harten Bürsten (Borsten aus Metalldraht) zu einem geringen Abtrag des Werkstoffs kommt. Man verwendet zumeist rotierende Bürsten. Für Bohrungen oder kleine Öffnungen werden spezielle Bürsten benötigt. Die Staubentwicklung bei diesem Verfahren ist je nach zu entfernenden Stoffen groß, was dann entsprechenden Schutzmassnahmen erfordert. Ein Vorteil ist die viel kleinere Abfallmenge im Vergleich zum chemischen Beizverfahren.

Ziel dieses Verfahrens ist zumeist die Ablösung von fest anhaftenden Verunreinigungen wie Farben, Lacken oder Zunder. Das Verfahren kann vollautomatisch betrieben werden, oder die Bürste wird manuell am Bauteil geführt [Bürsten, 2009].

9.2.3 Schleudern

Beim Schleudern handelt es sich um ein Vorreinigungsverfahren zum Entlasten nachfolgender Reinigungsanlagen, wie die wässrige Badentfettung. Dadurch wird die Badstandzeit des wässrigen Reinigungsverfahrens erhöht. Das Schleudern dient zum Entfernen von Flüssigkeiten und Späne. Angewandt wird das Schleudern vor allem bei Kleinteilen, die in rotierende Trommeln gefüllt werden. Es ist aber auch auf größere Teile anwendbar, die auf einem Rotationsteller eingespannt werden müssen. Kombiniert man das Schleuderverfahren nicht mit Waschlösungen, so kann man Teile des Öls oder der Kühlschmierstoffe sofort zurückgewinnen. Durch Schleudern kann nach einer Nassreinigung ebenso vorgetrocknet werden.

Die Trommeln sind meist horizontale oder vertikale Trommeln mit Siebwänden oder konische, vollwandige, horizontale Trommeln [Schleudern, 2009].

9.2.4 Abblasen

Beim Abblasen wird ein scharfer Luftstrahl mittels Düsen auf das Bauteil gerichtet, der Verunreinigungen vom Bauteil entfernt. Dadurch sind bei trockenem Schmutz hohe Reinheitsgrade erreichbar. Partikeln im Mikrometer-Bereich bleiben jedoch am Bauteil haften. Flüssige und pastenartige Verunreinigungen hinterlassen selbst bei hohem Druck einen Film an der Bauteiloberfläche und ein zweites Reinigungsverfahren sollte nachgeschaltet werden. Sind auf der Oberfläche einer Flüssigkeit Partikeln vorhanden, ist das Verfahren des Abblasens weniger gut geeignet. Das Verfahren wird auch zur Vortrocknung nach wässrigen Reinigern eingesetzt.

Wird das Verfahren des Abblasens mit einer Absaugtechnik kombiniert, können die gelösten Verunreinigungen über einen Filter aus der Luft abschieden werden. Ein erneutes Anlagern am Bauteil wird dadurch verhindert. Bei einer optimal eingestellten Luftströmung können auch schwierige Bauteil-Geometrien gereinigt werden. Einen Nachteil dieses Verfahrens stellt der hohe Lärmpegel da [Abblasen, 2009].

9.2.5 Gleitschleifen

Gleitschleifen wird zum gleichzeitigen Reinigen, Entgraten und zur Oberflächenveredelung (Polieren, Aufhellen, Glätten,...) verwendet. Eingesetzt wird das Verfahren z.B. für Werkzeuge, Armaturen, Gussteile, Zahnräder, Beschläge, Patronenhülsen und andere Teile. Zusammensetzung und Größe der Schleifkörper (Chips) bestimmen Metallabtrag, Schleifbild und Oberflächenrauigkeit der Teile. Der Zusatz von Bearbeitungsfluide (genannt: „Compound“) unterstützt vor allem die chemische Reinigung und Entfettung. In diesem Fall handelt es sich um ein chemisch-mechanisches Verfahren. In einem Arbeitsbehälter werden die Chips und die Werkstücke und gegebenenfalls das Compound gegeneinander bewegt. Die Umwälzung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen [Gleitschleifen, 2009]:

- Umwälzung durch Schwerkraft

Durch eine umlaufende Trommel kommt es in Folge der Schwerkraft zu einer Relativbewegung zwischen Bauteil und Schleifkörper.

– Umwälzung durch Fliehkraft

Es handelt sich zumeist um zylindrische Behälter mit rotierendem Boden. Eine bis zu 30mal höhere Schleifleistung im Vergleich zu der Schwerkraft- Umwälzung oder Vibrationsverfahren sind möglich.

– Umwälzung durch Vibrationsförderung

Je nach Bauteilform unterscheidet man zwischen Rund-, (ringförmige Behälter), Trog- und Spiralvibratoren. Trogvibratoren werden für größere Werkstücke verwendet. Durch das Einsetzen von Zwischenwänden kann eine Berührung mit einem anderen Werkstück vermieden werden. In Spiralvibratoren durchwandern die Werkstücke in spiralförmigen Bahnen mehrmals den spiralförmigen Behälter, es handelt sich um einen Durchlaufbetrieb. Zudem zeichnen sich die Spiralvibratoren durch einen geringen Platzbedarf aus.

– Schleppscheifen

Beim Schleppscheifen werden die Bauteile z.B. mit Stangen durch das Schleifkörper-Bett geschleppt. Dadurch wird eine gegenseitige Berührung der Werkstücke vermieden, was für manche hochwertige, empfindliche Werkstücke Bedingung ist. Man erreicht eine bis zu 40mal höhere Schleifleistung als mit Vibrationsförderanlagen.

Vorteile	Nachteile
sehr reine Oberflächen mit geringer Rauigkeit-Tiefe	da es sich um ein abtragendes Verfahren handelt, kommt es zu Abrundungen von Kanten und leichten Geometrieänderungen
nur geringe Mengen an Frischwasser nötig (bei Wasserrecycling)	Abrieb der Schleifkörper und Werkstücke (wird meist durch Zentrifugen oder Flotation entfernt)
	Lärm durch Aufprallen der Werkstücke aneinander oder an der Wand
	bei Trommelanlagen: nur Chargen-Betrieb möglich

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Gleitschleifens

9.3 Strahlverfahren

9.3.1 Druckluftstrahlen

Das Strahlmittel wird mit Druckluft von etwa 2-3 [bar] auf das Reinigungsobjekt geschossen. Die Reinigungswirkung des Trockenstrahlverfahrens besteht dabei aus der Energie des Aufpralls und des Entlangschlitterns des Strahlmittels an der Werkstoffoberfläche. Viele verschiedene Strahlmittel sind möglich, siehe dazu gleichnamiges Kapitel bei den Feststoffreinigern. Das Strahlmittel, der/die Strahlwinkel sowie die Düsen spielen eine große Rolle zur Einstellung des gewünschten Effekts. Druckluftstrahlen wird hauptsächlich zur Vorbereitung von Metalloberflächen

für nachfolgende Beschichtungen, und zum Entrosten, und zum Abtragen von fest haftenden Verunreinigungen wie Farbe oder Zunder verwendet. Man kann zwischen mehreren Arten von Druckluftstrahlen unterscheiden: Das Strahlmittel kann über Druck in die Druckluft gebracht werden (Druckstrahlen), oder durch Unterdruck (Injektorstrahlen). Bei letzterem wird der Unterdruck durch die Druckluft in der an der Strahlpistole angeschlossenen Saugleitung erzeugt. Befindet sich die Düse in einem Saugkopf, der dicht an die Werkstoffoberfläche geführt wird und Strahlmittel und abgelöste Verunreinigungen absaugt, so spricht man vom Saugkopfstrahlen, wobei das Luft-Strahlmittel-Gemisch auch durch Vakuum im Saugkopf beschleunigt werden kann. Druckluftstrahlen ist nicht für empfindliche Oberflächen geeignet, da je nach Strahlmittel und Werkstoff des Bauteils ein unterschiedlich großer Abtrag stattfindet. Weitere Nachteile stellen der entstehende Staub und absplitternde Partikel und Lärm dar, die Schutzvorrichtungen (z.B. Masken, Absauganlagen) erfordern. Neben Handstrahlapparaten kommen ebenso automatische Durchlaufanlagen zur Anwendung [Druckluftstrahlen, 2009].

9.3.2 Schleuderstrahlen

Bei diesem Verfahren wird das Strahlmittel durch rotierende Räder auf das Bauteil gestrahlt. Ansonsten ist es dem Druckluftstrahlen sehr ähnlich. Es wird ebenso zur Vorbereitung von Metalloberflächen für nachfolgende Behandlungen, sowie zum Entfernen von Rost und Zunder und anderem angewandt und eignet sich nicht für empfindliche Oberflächen.

Zumeist werden stationäre Anlagen verwendet. Für kontinuierliche Anwendung, wie Durchlaufverfahren ist es meist besser geeignet als das Druckluftstrahlen. Allerdings müssen die Bauteil-Oberflächen zugänglich sein [Schleuderstrahlen, 2009].

9.3.3 Nassstrahlen

– Nassdruckluftstrahlen

Das Nassdruckluftstrahlverfahren ähnelt dem Druckluftstrahlverfahren, nur wird zusätzlich vor oder nach der Düse Wasser beigefügt, sodass ein Strom aus Luft, Wasser und Strahlmittel auf das Bauteil gestrahlt wird. Es kommt dann zum Einsatz, wenn der Staub auf ein Minimum reduziert werden muss oder die zu strahlenden Oberflächen empfindlich sind. Es kann der gleiche Stahl-Oberflächenvorbereitungsgrad (SA 3) wie bei Druckluft- oder Schleuderstrahlen erreicht werden, die Menge an löslichen Salzen wird allerdings verringert. Jedoch verbleibt nach dem Strahlen eine Schlammschicht auf der Werkstückoberfläche, die mit Druckluft oder einem Wasserstrahl entfernt werden muss. Zudem ist ein Trockenschritt vor einer nachfolgenden Beschichtung notwendig.

Hinsichtlich Strahlmittel gibt es eine Einschränkung: Im Allgemeinen werden nur Nicht-Eisenmaterialien verwendet, die meist nach dem Strahlen nicht wieder verwendbar sind. Und auch Rost am Bauteil (z.B. Flugrost) kann ein Problem darstellen. Es werden dem Wasser deswegen oft Rostinhibitoren zugesetzt, welche aber mit nachfolgenden Beschichtungen kompatibel sein müssen [Nassdruckluftstrahlen, 2009].

– Feuchtstrahlen

Das Feuchtstrahlen entspricht dem Druckluftstrahlen, es wird nur ein wenig Flüssigkeit vor der Düse dem Luft/Strahlmittel beigegeben (~20 l/h), um eine Staubentwicklung kleiner Partikel zu verhindern. Im Gegensatz zum Nassdruckluftstrahlen trocknen die Bauteile meist von selbst nach einigen Minuten. Um Rost zu verhindern sind wiederum Rostinhibitoren zuzusetzen [Feuchtstrahlen, 2009].

– Druckflüssigkeitsstrahlen

Beim Druckflüssigkeitsstrahlen wird Wasser unter hohem Druck durch Düsen auf das Bauteil gestrahlt, Druckluft wird hier nicht verwendet. Um die Abrasionswirkung zu erhöhen kann dem Wasser Strahlmittel beigemischt werden. Der gewählte Druck hängt von der Anwendung ab, zum Entlacken werden bis zu 1700 [bar] verwendet, zur Reinigung von z.B. Kanälen nur zwischen 50 und 200 [bar]. Andere Einsatzgebiete sind Entschichten, Entrosten, Entzundern. Lösliche Salze werden sehr gut entfernt. Der bei der Reinigung entstehende Schlamm muss erst von der Oberfläche entfernt werden, um das Reinigungsergebnis beurteilen zu können. Auch hier kommen in der Regel nur Nichteisenmetalle als Strahlmittel in Frage, die meist nicht wieder verwendbar sind [Druckflüssigkeitsstrahlen, 2009].

– Schlammstrahlen

Das Schlammstrahlen entspricht dem Druckflüssigkeitsstrahlen, nur wird hier mit geringem Druck von einigen bar gearbeitet. Es kommt zur Feinst-/Finish-Bearbeitung bei gleichzeitiger Reinigung zur Anwendung, da es eine feine, gleichmäßige Oberfläche erzeugt. Typische Einsatzgebiete sind: Entzundern von Feinguss, Mikro-Entgraten, Polieren oder Verfestigen von Oberflächen, Reinigen chirurgischer Instrumente. Lösliche Salze werden wieder entfernt, zudem ist ebenso hier ein Abspülen von verbliebenen Strahlmittel erforderlich [Schlammstrahlen, 2009].

– Dampfreinigungsstrahlen

Wasser wird unter Druck auf Temperaturen über 100 [°C] erhitzt, und dann mit einer Düse auf das zu reinigende Bauteil gestrahlt. Je nach Druck kann das Verhältnis zwischen Menge an Dampf und kochendem Wasser im Strahl eingestellt werden. Dampf eignet sich dabei gut zur Reinigung von empfindlichen Oberflächen oder zum Nachspülen, während kochendes Wasser gegen hartnäckige Verunreinigungen verwendet wird.

Durch die hohe Wärme verlaufen Öle und Fette am Werkstück. Der Zusatz von Waschmitteln ist möglich, um die Reinigungswirkung zu verstärken. Eine Trocknung ist bei diesem Verfahren nicht notwendig, da die Teile wegen der hohen Wärme bald von selbst trocknen. Im Gegensatz zum Hochdruck-Spritzstrahlen wird viel weniger Wasser benötigt.

Man wendet das Verfahren dort an, wo eine starke mechanische Spül- und Schwemmwirkung gefordert wird. Das Verfahren eignet sich unter anderem für die Reinigung von Baumaschinen, Böden und Wänden, Maschinentischen usw. Neben transportablen Geräten finden sich auch stationäre, wobei momentan nur wenige Anlagen zur automatischen Serien-Reinigung angeboten werden [Dampfreinigungsstrahlen, 2009].

9.3.4 CO₂ Schnee Strahlen

Flüssiges, unter Druck (~60 bar) befindliches CO₂ wird entspannt, wodurch es sich wegen der Ausdehnung abkühlt. Hierbei entsteht CO₂ Schnee aber auch gasförmiges CO₂. Der Schnee kann ohne oder mit zusätzlichem Trägergas (meist Luft) auf das Werkstück gestrahlt werden, wobei das Trägergas die Reichweite vergrößert. In der Regel wird CO₂ Schnee Strahlen nur zur Feinstreinigung eingesetzt, wenn aber die Eiskristalle weiter aufbereitet und wachsen gelassen werden, bevor man sie ins Trägergas gibt, so erweitert sich das Anwendungs-Spektrum.

Die Reinigung selbst basiert auf mehreren Effekten. Zum einen findet ein Loslösen oder Lockern der Verunreinigung durch Temperaturversprödung infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Bauteil und Verschmutzung statt. Des Weiteren wird der Schmutz ebenso durch Wegblasen oder Wegsprengen auftreffender Partikel erreicht, wie auch durch Sublimationsexpansion von Schnee. Zudem werden organische Verschmutzungen teilweise in flüssigen CO₂ gelöst, das ein hohes Lösevermögen besitzt und durch den Impuls wegtransportiert. Flüssiges CO₂ entsteht, da beim Auftreffen von Kristallen am Bauteil stellenweise hoher Druck herrscht.

Ein Vorteil des CO₂ Strahlens liegt darin, dass es sich hierbei um ein lösemittelfreies, trockenes Verfahren handelt, da das CO₂ gleich verdampft. CO₂ ist zudem kaum gefährlich, es dürfen nur nicht zu hohe Konzentrationen am Arbeitsplatz wegen Erstickungsgefahr entstehen. Es wird als Abfallprodukt anderer Prozesse oder aus der Luft gewonnen, wodurch das Verfahren nicht zum Treibhauseffekt beiträgt.

Dieses Verfahren wird von der Präzisionsreinigung von schonend zu behandelnden Oberflächen z.B. Leiterplatten bis zur großflächigen Reinigung von Maschinen, Bauteilen und Anlagen angewandt. Es wirkt nicht abrasiv. Gegen stark haftende Verunreinigungen wie Verkrustungen, Rost usw. muss deswegen auf andere Verfahren zurückgegriffen werden. Sonst werden allerdings Partikeln (anorganische oder organische), Ölfilme, Fette, Fingerabdrücke usw. entfernt. Neben handgeführten Apparaten existieren ebenso automatische Anlagen. Es müssen allerdings alle zu reinigende Flächen angestrahlt werden können und die Teile dürfen nicht weggeblasen werden [CO₂ Schnee Strahlen, 2009].

9.3.5 CO₂ Pellets Strahlen

Dieses Verfahren dient als Ersatzverfahren für herkömmliche abrasive Reinigungs- und Entschichtungs-Verfahren, wie Sandstrahlen, Druckwasserstrahlen, Schleifen, etc.

Die Pellets besitzen zumeist einen Durchmesser von 1 - 6 [mm] und eine Länge von 5 – 15 [mm]. Sie werden durch Pressen von CO₂-Schnee erzeugt. Wegen der relativ geringen Härte der Pellets, die in etwa der des Gipses entspricht, tritt kaum eine Abrasion des Substrates auf. Edelstahl bleibt abrasionsfrei, während bei weicheren Werkstoffen, wie Aluminium, eine Aufrauung bei starkem Strahl entsteht.

Die Pellets werden mit hoher Geschwindigkeit durch einen Druckluftstrahl (bis 300 m/s) oder ein Schleuderrad auf die zu reinigende Oberfläche geschossen, infolge der Temperaturversprödung und unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten entstehen Risse zwischen Bauteil und Verunreinigung. Die Pellets können nun in die Risse eindringen und die Verunreinigungen absprengen.

Im Gegensatz zum Sandstrahlen ist die Staubbelastung um 70 [%] geringer. Ein weiterer Vorteil ist die Verdampfung des CO₂, wodurch nur der abgelöste Schmutz übrig bleibt. Als Nachteil wäre der verursachte Lärm zu erwähnen.

9.4 Sonderverfahren der Bauteilreinigung

9.4.1 Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid (CO₂)

Bei Drücken über 65 [bar] liegt CO₂ bei Raumtemperatur als Flüssigkeit vor. Es findet Anwendung als Feinreinigungsverfahren und wird meist bei Drücken von 150 [bar] betrieben. Der Vorteil von flüssigem CO₂ liegt im hohen Löse-Vermögen, welches allerdings im Vergleich zu FCKW um 4 Zehnerpotenzen bei 65 [bar] geringer ist, erst bei 500 [bar] dem des FCKW entspricht.

In einer Hochdruck-Reinigungskammer werden ein oder mehrere Bauteile dem flüssigen CO₂ ausgesetzt, das auch Hilfsstoffe wie Tenside oder sonstige Additiven enthalten kann. Danach wird das flüssige CO₂ aus der Reinigungskammer gepumpt, und unter verminderten Druck in einem Abscheider von den Verunreinigungen getrennt, danach in einen Vorratsbehälter geleitet. Ebenso werden eventuelle Zusatzstoffe von Verunreinigungen befreit und ebenfalls in einen Behälter gespeichert. Zur Energierückgewinnung kann man das flüssige CO₂ auch in einer Turbine entspannen [Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid, 2009].

Vorteile	Nachteile
Betriebskosten gering (Energiekosten relativ gering, keine Abwasserkosten oder Entsorgungskosten für das Lösemittel), CO ₂ billig	hohe Anschaffungskosten
Bauteile verlassen die Kammer trocken	Teile müssen den Druck aushalten (ungeeignet bei Elastomeren,...)
CO ₂ relativ ungefährlich (keine Bildung explosiver Gemische), nicht giftig, keine Umweltbelastung	

Tabelle 4: Vor- und Nachteile bei Reinigen mit flüssigen Kohlendioxid (CO₂)

9.4.2 Reinigen mit überkritischen CO₂

Überkritisches CO₂ besitzt eine geringere Viskosität und eine geringer Oberflächenspannung als flüssiges CO₂ und ist deswegen besser für feine Poren und Spalten geeignet. Das Lösungsvermögen ist etwas geringer als bei flüssigem CO₂, deswegen empfiehlt es sich, die Anlage so auszulegen, dass sie sowohl im flüssigen wie auch überkritischen Bereich betreiben werden kann. Fette, Öle und Wachse mit hohem Molekulgewicht können nur schwer entfernt werden [Reinigen mit überkritischen CO₂, 2009].

Das Verfahren ähnelt dem Verfahren mit flüssigem CO₂, wird aber meist bei Drücken von 138-276 [bar] und Temperaturen zwischen 35 [°C] und 65 [°C] eingesetzt. Es gelingt eine sehr hohe Reinheit zu erzielen. Für Vor- und Nachteile sowie Beschreibung der Anlage siehe Kapitel: „Reinigen mit flüssigem CO₂“ [Reinigen mit überkritischen CO₂, 2009].

9.4.3 UV-Licht Reinigung

Die Bauteile werden in eine Reinigungskammer gegeben, die mit einer Ozon- Atmosphäre oder wässrige H_2O_2 -Lösung gefüllt ist. Durch UV-Strahlung wird das O_3 bzw. H_2O_2 in freie Radikale gespalten, die dann mit dem organischen Schmutz reagieren. Die UV-Strahlung regt ebenso die Schmutzmoleküle an, sodass sie leichter mit den Radikalen reagieren. Aber nicht alle organischen Verbindungen wie Spaltprodukte (z.B. Carbon-Säuren) können entfernt werden. Ebenso wenig Partikel, Salze oder ionische Verschmutzungen. Mittels Modifikatoren kann das Bauteil auch von dünnen anorganische Schichten gereinigt werden.

Bei der UV-Licht-Reinigung handelt es sich um ein Präzisionsreinigungsverfahren. Es eignet sich besonders für dünne, organische Schmutz-Schichten. Ansonsten ist eine Vorreinigungsstufe zu empfehlen. Dieses Verfahren ist bei vielen Materialien anwendbar, wie Oberflächen aus Metall, Keramik, Glas, Halbleiter, Silikon und andere. Bei Verwendung von Ozon handelt es sich im Gegensatz zur Verwendung von H_2O_2 um ein trockenes Reinigungs-Verfahren. Die Anlagen müssen hermetisch abgeriegelt sein, sodass kein Ozon entweichen kann. Zur Bauteil-Reinigung sind derzeit nur wenige Anlagen auf dem Markt, aber in der Abwasserreinigung und zur Feinstreinigung von Substraten mit hoher Reinheitsanforderung wird dieses Verfahren angewendet [UV-Licht Reinigung, 2009].

9.4.4 Blitzlampenreinigung

Auch bei der Reinigung mit Blitzlampen handelt es sich um ein Präzisionsreinigungsverfahren, welches allerdings noch in der Entwicklungsphase steckt (Stand 2001). Zum Einsatz kam dieses Trockenreinigungsverfahren bisher z.B. zur Entlackung von Flugzeugen, Schiffen und Brücken sowie zur Entfernung von Fotolacken von Wafern.

Der Lichtblitz einer Xenon-Lampe wird mit einem Parabolspiegel auf die Bauteiloberfläche fokussiert. Durch die hohe Energiedichte verdampft der Schmutz am Bauteil. Ein Luftstrahl unterstützt die Entfernung nichtverdampften Schmutzes. Lichtblitz und Luftstrahl wechseln sich ab, dadurch kommt es zu starken Temperatur-Schwankungen, die die Ablösung der Schmutzschicht begünstigen, aber auch die Anwendbarkeit der Bauteil-Materialien einschränkt.

Manchmal wird dieses Verfahren auch mit CO_2 -Pellets/Schnee-Strahlreinigung kombiniert, wodurch sich noch höhere Temperaturwechseln ergeben.

Es gelingt mit der Blitzlampenreinigung selektiv Schichten abzutragen, wenn es exakt gesteuert wird (z.B. Abtrag einzelner Lackschichten). Doch es handelt sich auch um ein sehr teures Verfahren, speziell wenn es mit CO_2 -Schnee/Pellets-Strahlen kombiniert wird [Blitzlampenreinigung, 2009].

9.4.5 Plasmareinigung

Mit der Plasmareinigung kann eine extrem hohe Reinheit erzielt werden, allerdings eignet es sich wegen der geringen Abtragsrate nur für wenig verschmutzte Teile und somit nur zur Fein- bzw. Feinstreinigung für höchste Reinheitsanforderungen.

Ein Plasma ist ein gasförmiges Gemisch bestehend aus Molekülen (auch Radikale), Atomen, Ionen und freien Elektronen. Durch den hohen Anteil der reaktiven Teilchen werden die

organischen Verschmutzungen zersetzt. Plasma wird gewöhnlich mittels elektrischen Entladungen erzeugt, und benötigt daher viel Energie (Entladungen bei ca. 1000 V oder mehr und 50 kHz). Für verschiedene Anwendungsfälle können unterschiedliche Gase zur Plasmaerzeugung verwendet werden. Zur Entfernung organischer Verschmutzungen wie dünne Öl- oder Fettschichten, wird meist reiner Sauerstoff gewählt [Plasmareinigung, 2009].

Vorteile	Nachteile
sehr hohe Reinheiten (höher als mit FCKW's)	nicht gegen anorganischen Schmutz geeignet
berührungsloses, nicht abrasives Verfahren	nur bei gering verschmutzten Teilen
sehr Umweltschonend, da keine Abfälle und fast überhaupt keine Abgase entstehen	relativ hoher Energieverbrauch
auch zur Entfernung von Adsorptionsschichten	
trockenes Verfahren	

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Plasmareinigung

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zwei Anwendungsvarianten:

– Reinigung durch atmosphärische Korona-Entladung

Das Verfahren bei atmosphärischem Druck wird atmosphärische Korona-Entladung genannt. Es dient zur Reinigung von glatten, gut zugänglichen Oberflächen (z.B. Metall-Bändern). Der elektrische Durchschlag zwischen den zwei Elektroden – wovon eine meist das Bauteil darstellt – wird auf einige Nano-Sekunden begrenzt, sodass sich das Plasma nur wenig erwärmt. Dieses Verfahren kann einfacher in den Produktionsprozess eingegliedert werden, z. B. wenn die Entladung im Durchlaufverfahren stattfindet. Anwendungs-Beispiele stellt die Entfettung von Alubändern vor der Bedruckung, die Reinigung von Stahlbändern vor dem Beschichten oder die Entfernung von anhaftenden Tensiden zwischen einzelnen Schritten einer Reinigungsanlage dar.

– Reinigen mit Niederdruckplasma

Das Bauteil wird in einer Kammer bei einem Druck von 0,1 bis 100 [Pa] gereinigt. Durch den geringeren Druck werden die geladenen Teilchen im elektrischen Wechselfeld auf höhere Geschwindigkeiten beschleunigt und erzeugen durch Zusammenstoßen mit anderen Molekülen höhere Anteile an reaktiven Teilchen. Auch schwierige Bauteil-Geometrien können behandelt werden. Einsatzbeispiele wären z. B. die Reinigung von Wafern, Leiterplatten, Kunststofflinsen, Zahnrädern, Kolbenringen und Injektionsnadeln.

9.4.6 Elektro-Chemische Reinigung

Das Bauteil wird als Kathode oder Anode geschaltet und in ein Bad mit Elektrolyten und einer Gegenelektrode getaucht. Durch das Anlegen einer Gleichspannung bilden sich H₂ oder O₂ Bläschen an der Bauteil-Oberfläche unterhalb des Schmutzes, welche diesen von der Oberfläche lockern und mitreißen.

Dieses Feinreinigungsverfahren ist auf elektrisch leitende Bauteile mit dünnen Schmutzschichten beschränkt. Es wird meist als letzter Verfahrensschritt vor der galvanischen Beschichtung eingesetzt, und dauert gewöhnlich unter zwei Minuten [Elektrochemische Reinigung, 2009].

9.4.7 Vakuumentölen

Beim Vakuumentölen werden die flüssigen Verunreinigungen (Öle, Kühlschmierstoffe) auf den Bauteilen in einer Vakuumkammer durch Erhitzen verdampft. Die Geometrie der Bauteile spielt somit keine Rolle, es ist auch möglich ganze Apparate ohne Zerlegung zu reinigen. Partikelschmutz oder pastöse Verunreinigungen können meist nicht entfernt werden. Einen weiteren Nachteil stellt der hohe Energieverbrauch da. Die Dauer des Vakuumentölen beträgt wegen der Evakuierung und des Aufheizens ca. 5 bis 15 [min]. Der entstehende Öldampf kann kondensiert und somit das Öl je nach Verschmutzungsgrad wiederverwendet oder entsorgt werden [Vakuumentölen, 2009].

9.5 Flüssige Reiniger

Reinigungsverfahren und Systeme müssen immer individuell an die Gegebenheiten angepasst werden, wie zum Beispiel an den Werkstoff, die Verschmutzung, die Form und Menge der Teile. Deswegen sind Vorversuche unerlässlich [Jelinek et al., 1999, S.41].

Darum wird hier nur versucht, einen groben Überblick über die verschiedenen flüssigen Reinigersysteme zu geben. Tabelle 6 listet einige Reinigercharakteristika bekannter Reiniger ohne Anspruch auf Vollständigkeit auf. Im Anschluss an diese zusammenfassende Darstellung werden einzelne Reinigertypen näher beschrieben.

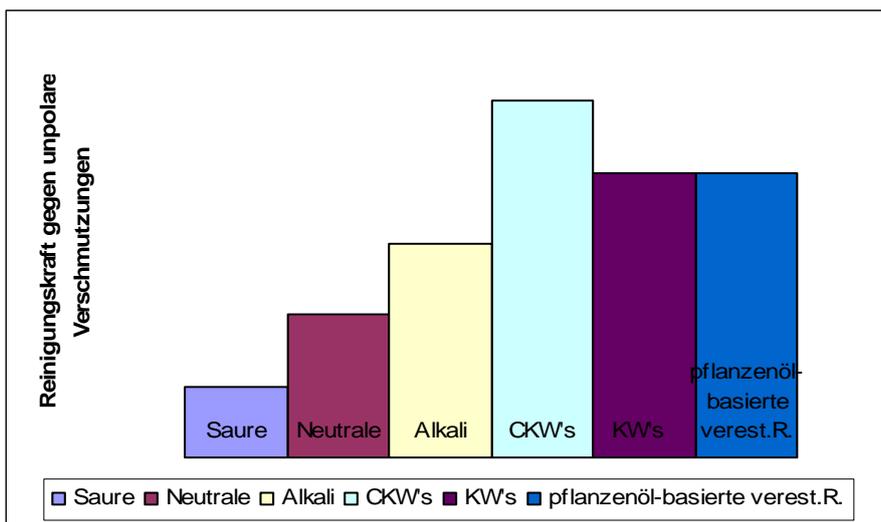


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Reinigungskraft

Der Grundsatz „gleiches löst sich im gleichen“ gilt auch für die Reiniger. Polare Verschmutzungen sollten vorzüglich mit wässrigen Reinigern entfernt werden, während die beste Wirkung gegen unpolaren Schmutz (die meisten Öle und Fette) mit organischen Lösungsmitteln erzielt werden kann. Durch Zugabe von Tensiden kann die Entfettungsleistung wässriger Systeme zwar stark

verbessert werden, die gleiche Lösekraft wie durch Einsatz von Kohlenwasserstoff-Reiniger ist aber kaum zu erreichen.

Als größter Nachteil sind allerdings die Brand- bzw. Explosionsgefahr und die Toxizität zu nennen. Sie weisen meist einen niedrigeren Siedepunkt auf, was zwar die Trocknung erleichtert und das Reinigungsverfahren Dampfentfetten erlaubt, aber neben der erwähnten Gefahr, mit einer größeren Verdunstung einhergeht. Darum sind meist geschlossene Anlagen erforderlich.

	wässrige Reiniger			organische LM			pflanzenöl- basierte veresterte R.	Wasser-KW- Emulsionen	MPC- Reiniger
	Saure	Neutrale	Alkali	CKW's	KW's	O-hältige KW			
gegen unpolare Verunreinigung	nur bedingt	mittel	gut	sehr gut ¹	gut (besser als Alkali)	ja	ja	ja; (schlecht bei fest haftenden)	ja
gegen polare Verunreinigung	ja	ja	ja	nur indirekt ²	nur indirekt ²	ja; schlechter als wässrige	nur indirekt ²	ja	ja
gegen Rost u. Zunder	ja (stark saure)	nein	ja (stark basische)	nein	nein	nein	nein	nein	Nein ³
Arbeitsschutz benötigt	ja	nein	ja, gefährlicher als meisten Säuren	Absaugung; geschlossene Anlage	Absaugung;	Absaugung;	keine Absaugung		nein
brennbar	nein	nein	nein	nur schwer	leicht	sehr leicht	ja, schwerer als KW	nein, in Regel nicht	nein
Toxizität	ja		ja	hoch	ja (geringer als CKW)	ja (viel geringer als CKW)	gering	gering (abhängig von KW)	kaum
Anwendung:	z. B.: gegen hartnäckige anorganische Verunreinigun- gen; wenn leichte Verätzungs- erscheinungen erlaubt sind	sehr gute Material- Verträglich- keit	mm häufigsten in Metallindustrie ; bei an- und organischen Verschmutzun- gen; pH>10: nicht bei Alu- Teilen	z. B.: gegen hartnäckige organische Verunreinigun- gen;	allgemeine Metall- Entfettung	untergeordnet e Rolle; z. B.: Kalt- Reinigung von Hand; gegen polare und unpolare Verunreinigun- g (Klebstoffe,..)	Konkurrenz zu KW; nur Dampfentfett- en nicht möglich; nicht bei zinkhaltigen Teilen	Nicht für Fein- Reinigung; z. B. bei leicht verschmutzten Oberflächen mit erhöhter Korrosions- schutzanforderu- ng	z.B. in der Präzisions- Reinigung

Tabelle 6: Eigenschaften flüssiger Reiniger

¹ auch gegen verkrustete, oxidierte Fette

² nur wenn die polaren Partikel nicht am Bauteil haften sondern auf der Fett- oder Ölschicht

³ Oxidschichten können mit Zusatzstoffen entfernt werden

Zumeist sind mehrere Reingertypen für die Reinigungsaufgabe einsetzbar. Wählt man den Reingiger nach Kosten aus, darf man Sicherheitskosten, Umweltauflagen, Abwasserkosten, Personalkosten und andere Nebenkosten nicht vergessen.

9.5.1 Wässrige Reingiger

Man kann wässrige Reingiger nach dem pH-Wert unterteilen, oder nach der Wirkungsweise der Emulgierung der Verschmutzung in der Flüssigkeit. So unterscheidet man zwischen emulgierenden und demulgierenden Systemen.

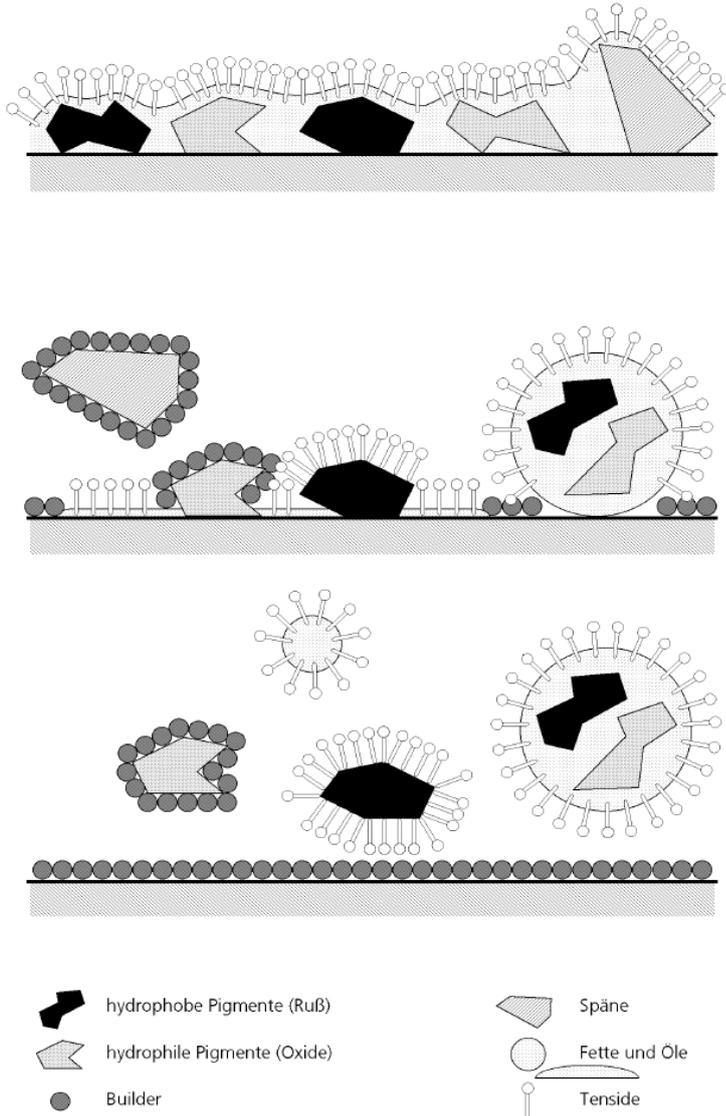


Abbildung 11: Wirkungsweise wässriger Reingiger [Brunn et al, 1997]

Wässrige Reingiger entfernen unpolaren Schmutz (z.B. Öl) hauptsächlich mittels Tensiden. Darunter versteht man längliche Makromoleküle mit einem polaren und unpolarem Ende, wobei das polare Ende in der Lösung positiv (kationische/ kationenaktive Tenside), negativ (anionische/anionenaktive Tenside), sowohl positiv als auch negativ (amphotere Tenside) und gar nicht geladen (nichtionische Tenside) vorliegen kann. An der Öl- Wassergrenzfläche ordnen sich die Tenside nun so an, dass das polare (hydrophile) Ende ins Wasser und das unpolare in das Öl

ragt. Dadurch wird die Grenzflächenspannung gesenkt und die Löslichkeit des Öls im Wasser erleichtert. Haben sich erst einmal kleine Öl-Tröpfchen von der Schmutzschicht gelöst, so verhindert die gleiche Polarität/Ladung der ins Wasser ragenden Tenside sowohl an den Öltröpfchen und der Schicht ein erneutes Anlagern an selbige. Genauso wird das Zusammenfließen mit anderen Tröpfchen erschwert, die Tropfen liegen fein verteilt im Wasser vor. Man spricht von einer stabilen Emulsion. Dieses Emulgierverhalten liegt also in der Natur der Tenside und ist für den Waschprozess ausdrücklich erwünscht, weshalb Tenside oft mit dem Überbegriff für Emulsionsstabilisatoren „Emulgatoren“ gleichgesetzt werden. Aus diesem Verhalten resultiert allerdings auch nicht ganz einfach zu reinigendes, verschmutztes Wasser. Wegen letzterem Problem wurden demulgierende Reiniger- Systeme entwickelt.

Im Gegensatz zu emulgierenden wird bei demulgierenden Reinigern die Bindung zwischen Tensid und Öl bzw. Fett nach einiger Zeit wieder gelöst, und somit die Stabilisierung der Emulsion aufgehoben. Dadurch kann man die organische Phase besser von der wässrigen trennen, was meist mit einem einfachen Ölabscheider geschieht. Stabile Emulsionen hingegen, sind nicht durch einfache Schwerkraft- Abscheideverfahren trennbar, man benötigt dazu aufwendigere Verfahren, wie z.B. Membranverfahren. Ein weiterer Vorteil demulgierender Reiniger besteht in der weitgehenden Wiederverwendbarkeit der Tenside für erneute Reinigungsvorgänge. [N.N., Wenn die Chemie..., 2005]



Abbildung 12: Unterschied zwischen emulgierenden (1.stes und 3.tes Gefäß) und demulgierenden (2.tes und 4.tes Gefäß) Reinigern nach einer Minute Standzeit [Demulgierende Reiniger, 2009]

Der Nachteil demulgierender Systeme liegt aber in einem geringeren Schmutztragevermögen. Sie sind deswegen bei stark anhaftenden Verunreinigungen und bei hochviskosen Ölen und Fetten nicht einsetzbar [AG-BREF-Oberflächentechnik, 2002, S.32f; Gräf, 1998].

Die demulgierende Eigenschaft solcher Reiniger verschwindet in der Praxis oft nach einiger Zeit. Dies liegt vor allem an den stabilisierenden und emulgierenden Additiven der Bearbeitungsflüssigkeiten (KSS, Öle). Breuer empfiehlt in diesen Fällen statt der Verwerfung des Reinigungs-Bades die Zugabe von externen Demulgatoren um die rasche Ölabtrennbarkeit wieder zu gewährleisten [Breuer, 2008].

Allerdings müssen die Demulgatoren genau auf das Öl und die Tenside abgestimmt sein, um die Reinigungsleistung nicht negativ zu beeinflussen [Jelinek et al., 1999, S.90].

– Modulare Reiniger

Wässrige Reiniger bestehen bekanntlich aus mehreren Wirkstoffen. Üblicherweise werden sie als Komplettreiniger (Einkomponentenreiniger) zugekauft, wobei die einzelnen Komponenten in der spezifizierten Konzentration als Gemisch vorliegen. Anders verhält es sich bei modularen Reinigern (Zweikomponentenreinigern), deren Inhaltsstoffe getrennt in zumindest zwei Paketen vorliegen. Dadurch können einzelne Module (wie z.B. nur Tenside oder nur Builder) je nach Bedarf zu- bzw. nachdosiert werden. Bei unterschiedlichem Verbrauch von Reinigerkomponenten erlaubt dies das Einhalten bestimmter Konzentrationen, ohne die Flüssigkeit mit anderen, noch ausreichend vorhandenen Reiniger-Stoffen zu überfrachten. Die Wirtschaftlichkeit des Prozesses wird somit gesteigert. Modulare Reiniger sind daher vor allem bei Badaufbereitungssystemen zu empfehlen, die einen bestimmten Teil des Reinigers bevorzugt mit den Verschmutzungen aus dem System austragen (z.B. Membranfiltration).

– Tenside

In diesem Kapitel soll vor allem auf die Eigenschaften der Tenside eingegangen werden, und dies speziell auf anionische und nichtionische, da kationenaktive und amphotere Tenside in der Metallentfettung ohne wesentliche Bedeutung sind [Jelinek et al., 1999 S.77]. Die Phaseneigenschaften der Tenside sind insbesondere wegen der später besprochenen Tensidabtrennung aus wässrigen Lösungen sehr interessant.

Die industriell wichtigsten polaren Gruppen stellen bei anorganischen Tensiden Sulfonate und bei nichtionischen Tensiden Ethoxylate da. (Verbindungen mit einem oder mehreren angelagertem Ethylenoxid) [Kosswig, 2002].

Nichtionische Tenside bilden Wasserstoffbrückenbindungen, die allerdings bei höheren Temperaturen wieder gebrochen werden. Die Tenside sind dann nicht mehr im Wasser gelöst, und aus einer klaren Lösung entsteht eine trübe. Diese Temperatur wird daher Trübungspunkt genannt, sie ist abhängig von der Tensidkonzentration und kann durch Salze stark abgesenkt werden [Jelinek et al., 1999; Kosswig, 2002]. Bei Temperaturen oberhalb des Trübungspunktes schäumen die Reiniger deutlich weniger als unterhalb, weswegen für Spritzreiniger auf nichtionogener Tensid-Basis eine Untergrenze als Anwendungstemperatur gesetzt wird [Jelinek et al., 1999, S.77]. Die maximale Reinigungswirkung wird bei dieser Temperatur erzielt [Planasch, 2003]. Bei deutlicher Überschreitung des Trübungspunktes ballen sich die zuerst fein verteilten Tensidtröpfchen zusammen (koagulieren) und fallen in Form von Makromolekülen von etwa 400 [nm] aus [Jelinek et al., 1999; Fresner et al., 2006, S.104]. Dadurch wird die Abtrennung mittels Membranverfahren erleichtert, die Entfettung kann durch Bildung eines Tensidfilms an der Oberfläche aber stark beeinträchtigt werden [Jelinek et al., 1999, S.77].

Nichtionische Tenside sind weniger empfindsam gegenüber hartem Wasser als anionische Tenside. Die Eigenschaften der meisten nicht-ionogenen Tenside sind wenig unterschiedlich [Kosswig, 2002]. Einige sind sehr gut bei niedrigen Temperaturen (30-60°C) zur Reinigung einsetzbar [Stache et al., 1979]. Allerdings sind manche nicht-ionischen Tenside (z.B. Alkylphenoethoxylat) nur schwer biologisch abbaubar und sollten deswegen nach Möglichkeit vermieden werden [DWA-Arbeitskreis, 2000].

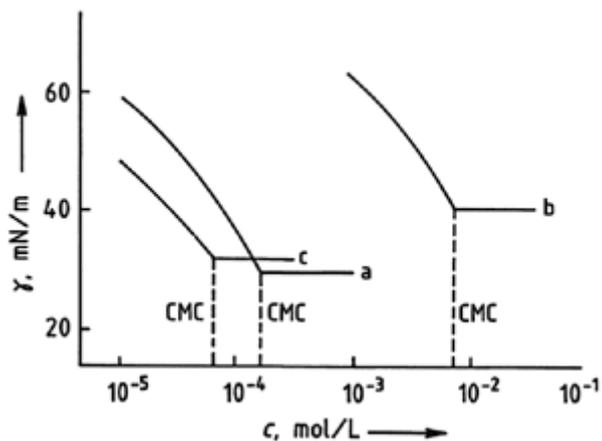


Abbildung 13: Oberflächenspannungsverläufe des Wassers ohne und mit Salz abhängig von der Tensid-Konzentration a.) nicht-ionisches Tensid (Dodecylheptaglycol-Ether) in Wasser; b.) ionisches Tensid (Dodecyl Sulfat) in Wasser; c.) Tensid von b.) in 0,1 N NaCl-Lösung [Kosswig, 2002]

Die kritische Mizell-Bildungskonzentration (CMC) ist eine Gleichgewichtskonzentration zwischen Mizellen, und in der Lösung sowie an den Phasengrenzflächen befindlichen Tensid-Monomeren [Lyko, 1994; Kosswig, 2002]. Sie tritt bei allen Tensiden auf. Erhöht man die Tensidkonzentration oberhalb CMC, so bilden sich nur mehr Tensid-Micellen aus, die Monomerkonzentration bleibt konstant, genauso wie die Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Die CMC kann deswegen einfach über den Oberflächenspannungsverlauf bestimmt werden. Jede Tensidart hat ihre charakteristische CMC, die unter anderem von Temperatur und Elektrolytkonzentration (stark bei ionischen, kaum bei nichtionischen) beeinflusst wird. Mit steigender Temperatur steigt die CMC bei ionischen Tensiden ein wenig an, während sie bei nichtionischen fällt. Im Vergleich zu nicht-ionischen weisen reine ionische Tensid-Lösungen meist eine ca. 10-fach höhere CMC auf [Kosswig, 2002].

– Neutralreiniger

Reiniger in einem pH Bereich von pH 6 bis 9 werden als Neutralreiniger bezeichnet. Zusammengesetzt sind sie meist aus einer Kombination aus nicht- und anionischen Tensiden. Anionische Tenside sind vor allem bei der Spritzreinigung zu empfehlen, da sie nicht schäumen. Seltener kommen Amphotere und kationische Tenside zur Anwendung. Falls erforderlich, können auch Korrosionsinhibitoren zugesetzt werden.

Zum Einsatz kommen neutrale Reiniger meistens bei der Spritzreinigung, da die enthaltenen Netzmittel bei der Tauchreinigung zur Abscheidung neigen und somit nicht mehr verfügbar sind [Völler, 1999]. Man kann mit ihnen besser entfetten als mit sauren Reinigern, allerdings schlechter als mit alkalischen Reinigern. Chemisch anhaftende Verunreinigungen wie Rost und Zunder können nicht entfernt werden.

Meist findet nach dem Reinigen noch ein Abspülen statt, außer wenn Korrosionsinhibitoren dem Reiniger zugesetzt sind. Wie bei allen wässrigen Reinigungsverfahren ist nach dem Reinigungsschritt ein Trocknungsschritt erforderlich [Neutralreiniger, 2008].

– Saure Reiniger

Saure Reiniger werden in stark saure Lösungen ($\text{pH} < 2$) und schwach saure Lösungen unterteilt ($\text{pH} = 2$ bis 6). Zusammengesetzt sind sie, neben Wasser, aus sauren Bestandteilen (an- und organische Säuren, saure Salze), wasserlöslichen organischen Lösungsmitteln (Alkohole und Ester), sowie aus oberflächenaktiven Substanzen (Tenside, Emulgatoren). Oft werden auch Inhibitoren zum Schutz gegen den sauren Angriff aufs Grundmaterial zugesetzt.

Reinigungsmechanismus:

Organische Verschmutzungen werden mit Hilfe von Tensiden abgelöst, die die Grenzflächenspannung herabsetzen. Das Umnetzen der Ölphase kann mit mechanischem Energieeintrag (Ultraschall, Fluten, Bürsten) unterstützt werden.

Anionische Partikel sind oft elektrostatisch geladen und haften deswegen gut an der Oberfläche. Durch Anlagern von H^+ Ionen an die Schmutzpartikel und der Oberfläche, wird nun eine elektrostatische Abstoßung erzeugt. Diese ist allerdings gering im Vergleich zur alkalischen Reinigung [Jelinek et al., 1999].

Vorteile:

- sehr gute Reinigungswirkung bei anorganischen Verunreinigungen
- gut gegen metallische Oberflächenoxide (Rost, Zunder)
- Verätzungserscheinungen auf dem Bauteil kann man – falls erwünscht – zu den Vorteilen zählen, ansonsten stellen sie einen Nachteil dar.

Nachteile:

Saure Reiniger sind nur bedingt gegen unpolare Verunreinigungen wie Öle und Fette einsetzbar. Einen weiteren Nachteil stellen die Verätzungsgefahr für das Personal und der damit verbundene Arbeitsschutz da. Vor allem muss man auf Spritzer, Dämpfe und Nebel (speziell bei Spritzreinigung) aufpassen. Zur Verhinderung von Dämpfen werden bei der Tauchreinigung meist Schaumbilder zugesetzt. Ein Mischen mit anderen Reinigern ist jedenfalls zu verhindern. Dieser Reiniger benötigt als zusätzliches Abwasseraufbereitungsverfahren eine Neutralisation. Eingesetzt werden Saure Reiniger meist im Temperaturbereich zwischen 60 bis 70 [$^{\circ}\text{C}$], wobei bei diesen Temperaturen auch mit einer erhöhten Dampfbildung zu rechnen ist [Saure Reiniger, 2008].

– Alkalische Reiniger

Alkalische Reiniger sind die am häufigsten eingesetzten Reiniger in der metallverarbeitenden Industrie. Sie werden in schwach (pH : $9 - 12$) und stark alkalische Lösungen ($\text{pH} > 12$) unterteilt.

Alkalische Reiniger setzen sich aus oberflächenaktiven Substanzen (Tenside, Emulgatoren) und Buildern zusammen. Builder sind maßgebend für die elektrische Leitfähigkeit des Reinigers, tragen unter anderem zum Einstellen des pH -Werts und der Wasserhärte bei, unterstützen die Entfernung von Partikelschmutz und können auch Inhibitoren zum

Bauteilschutz enthalten [Jelinek et al., 1999]. Zu den häufigen Buildern zählen Alkalihydroxide, Alkalicarbonate, Phosphate, Borax, Silikate und Cyanide.

Durch die Kombination von Tensiden und Buildern wird die Reinigungsleistung der Tenside verstärkt, wie nachfolgende Grafik darstellt. Dies betrifft aber nicht nur alkalische Reiniger sondern ebenso auch neutrale wässrige Reiniger.

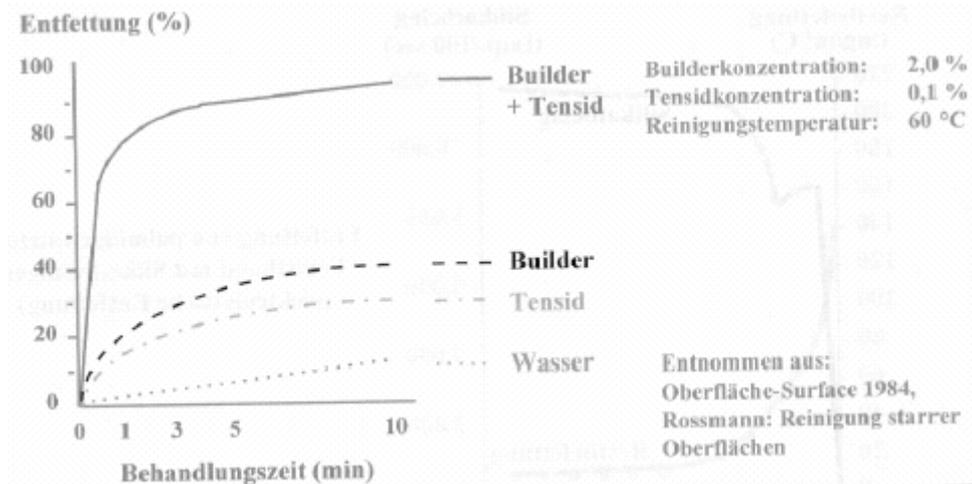


Abbildung 14: Synergieeffekte von Builder und Tenside [Brunn et al, 1997]

Reinigungsmechanismus [Alkalische Reiniger, 2008]:

Ähnlich wie bei sauren Reinigern werden Ionen, nur diesmal nicht positiv sondern negativ geladene, an die anorganischen Schmutzpartikel und die Oberfläche angelagert, was wiederum zu einer Abstoßung führt. Gegen organische Verunreinigungen kommt neben der Tensidwirkung noch eine Verseifungsreaktion der Öle und Fette in wasserlösliche Seifen zum tragen, allerdings nur bei stark alkalischen Lösungen.

Vorteile [Alkalische Reiniger, 2008]:

- gut gegen organische Verschmutzungen (besser als saure und neutrale Reiniger, allerdings nicht so gut wie organische Lösungsmittel)
- auch gegen anorganischen Verunreinigungen geeignet
- stark alkalische Laugen können Oberflächenoxide lösen

Bei stark alkalischen Lösungen muss man die Materialverträglichkeit prüfen, für eisenmetallische Werkstoffe sind sie aber geeignet.

Nachteile [Alkalische Reiniger, 2008]:

- Arbeitsschutz ist sehr wichtig, da die Laugen meist größere Schäden bei Horn- und Schleimhäuten anrichten können als die meisten Säuren.
- Neutralisation kommt zur Abwasserreinigung dazu

9.5.2 Organische Lösungsmittel

– CKW

Nachdem FCKW wegen Zerstörung der Ozonschicht verboten worden waren, boten sich Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) als naheliegende, atmosphären-freundlichere Alternative an. In Deutschland sind drei CKW zugelassen: Trichlorethylen (Tri), Perchlorethylen (Per) und Methylenchlorid (MC), wobei Tri und Per die am häufigsten angewendeten CKW sind.

Vorteile [CKW, 2008]:

- sehr starkes Fettlösevermögen (auch gegen oxidierte, verkrustete Fette)
- hervorragende Reinigungseigenschaften von organischen Stoffen im Allgemeinen (wie Fett, Öl, Harz, Pech, Wachs, Asphalt, Bitumen, Paraffine)
- geringe Oberflächenspannung
- leicht zu trocknen wegen niedrige Verdunstungszahlen (niedriger als bei KW, die Verdampfungswärme beträgt circa ein Zehntel der des Wassers)
- keine Oberflächenangriff wie Korrosion, Oxidation, Verätzung bei den meisten Metallen zu befürchten (allerdings nicht bei lackierten Flächen anwendbar)
- schwer brennbar, keine Explosionsgefahr
- hohe chemische Stabilität, sehr beständig
- kein Beitrag zur Ozonzerstörung oder zum Treibhauseffekt

Nachteile [CKW, 2008]:

- nicht gegen anorganische Verschmutzungen
- hohe Toxizität (Krebsrisiko, chronische Schäden) → nur geringe Abgaswerte erlaubt
- nur in geschlossenen Anlagen
- darf nicht ins Abwasser gelangen
- hoher Energiebedarf für Regenerierung
- unter extremer Hitze zersetzen sich CKW zu aggressiven Medien → ein Schweißen in der Nähe sollte daher vermieden werden

CKW werden meist beim Dampfentfetten, aber auch bei Spritz- und Tauchreinigung verwendet, wobei es sich um geschlossene Anlagen handeln muss. Sie sind gut mit Benzin, und Öl mischbar, besitzen aber keine Lösevermögen für Wasser.

– Kohlenwasserstoff-Reiniger (KW)

Kohlenwasserstoff-Reiniger sind meist unpolare Gemische bestehend aus unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen. Sauerstoffhaltige KW, die genau genommen eine Untergruppe der KW bilden, werden nachstehend behandelt. KW werden gewöhnlich aus entaromatisierten, paraffinischen und naphthenischen KW zusammengesetzt.

Vorteile:

- gutes Lösevermögen für Öle und Fette
- für alle Werkstoffe bis auf einige Kunststoffe geeignet (unpolare Lösungsmittel)
- kaum wassergefährdend

Nachteile:

- schlecht gegen polare, am Bauteil haftende Verunreinigungen
- meist sehr niedrige Flammpunkte (nach der Verordnung brennbarer Flüssigkeiten (VbF) zumeist eingeteilt in die Klassen AI bis AIII; AI entspricht einen Flammpunkt unter 21 [°C], AIII einem Flammpunkt unter 100 [°C]).
- da die Temperatur niedriger sein muss, als die Flammpunkt-Temperatur, folgt daraus für die Trocknung:
 - lange Trocknungszeiten oder
 - aufwendigere, genau überwachte Trocknung oder
 - Vakuumtrocknung (hier werden aber niedrigere Drücke und somit mehr Geld als bei einer Vakuumtrocknung von Wasser benötigt)
- es müssen Brand- und Explosionsschutzmassnahmen getätigt werden, außer die Temperatur ist geringer als die Flammpunktstemperatur. Bei der Explosion mit KW kann der Druck auf das 8-fache steigen.
- Toxizität (meist wesentlich geringer als bei CKW); Einatmen und in Kontakt kommen wirken sich negativ auf den Menschen aus
- Lösungsmittelverluste sind wegen Umwelt gering zu halten (z. B. durch Absaugung)
- Recyclefähige Wertstoffe müssen getrennt gesammelt und regeneriert oder wiederverwendet werden.

Zumeist findet eine Rückgewinnung der Lösemittel durch Destillation statt. Nicht recyclefähige halogenfreie Lösemittel ohne Störstoffe könne verbrannt werden. Haupteinsatzgebiet ist die allgemeine Metallentfettung in der Industrie. Bei den Reinigungsverfahren Dampfentfettung und Spritzreinigung ist besonders stark auf Brand und Explosionsgefahr zu achten [KW, 2008].

– Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe

Zusammengesetzt sind sie meist aus Alkoholen, Aldehyden, Ketonen, Estern oder Ethern und besitzen somit einen polaren wie auch einen unpolaren Molekülteil. Dadurch besitzen sie den Vorteil polare wie auch unpolare Verschmutzungen entfernen zu können.

Sauerstoffhaltige KW spielen eine untergeordnete Rolle in der Bauteilereinigung. Zumeist werden sie bei der kalten Reinigung von Hand angewendet. Zum Beispiel kommen sie wegen der guten Reinigung und des schnellen Trocknens in Bereichen der Elektronik, Optik und Feinmechanik zum Einsatz (z.B. Aceton; Es besitzt einen Flammpunkt von weniger als -20 [°C]). Man entfernt mit ihnen Polymerisate wie Kleb- und Dichtstoffe, Harze und Farben [Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe, 2008].

9.5.3 Wasser Kohlenwasserstoff Emulsionen

Für den KW-Anteil verwendet man oft hochsiedende Aliphate oder pflanzenölbasierte Reiniger. Man kann sie dabei je nach Mengenanteil in „Wasser in KW“ Emulsionen oder in „KW in Wasser“ Emulsionen unterteilen. Bei den Wasser in KW Emulsionen ist das Wasser als kleine Tröpfchen im KW verteilt. Bei diesen Reinigern verbleibt nach der Reinigung ein Schmierfilm am Werkstück. Der Schmierfilm kann störend aber auch als vorübergehender Korrosionsschutz erwünscht sein. Hingegen können die „KW in Wasser“-Emulsionen leicht nach der Reinigung mit Wasser abgespült werden.

Eine andere Einteilung erfolgt nach der Stabilität der Emulsionen. Instabile Emulsionen haben den Vorteil der automatischen Phasentrennung nach der Reinigung, und somit auch Trennung des polaren und unpolaren Schmutzes. Zudem brauchen sie keine Emulgatoren. Sie benötigen aber für die Reinigung eine ständige Durchmischung, die zum Beispiel durch Ultraschall oder Injektionsfluten verwirklicht werden kann.

Die Tröpfchengröße des Wassers oder der KW beträgt zwischen 0,1 [mm] und 10 [nm], wobei die Emulsionen je nach Tröpfchengröße milchig trüb bis klar sind.

Vorteile:

- universelles Lösevermögen (auch bei unbekanntem Verunreinigungen): polare Verunreinigungen lösen sich in der Wasserphase und unpolare in der KW-Phase.
- in der Regel nicht brennbar oder explosiv

Nachteile:

- wirken nur schlecht bei fest haftenden Verunreinigungen (wie eingepresste Mineralöle, verharzte Fette, Farbspritzer oder Oxide)
- für manche Anwendungen daher zu geringer Reinheitsgrad
- die Toxizität hängt von den verwendeten KW ab, aber zumeist nimmt man keine hochgiftigen oder krebserregende Komponenten

Die Zusammensetzung der Emulsion sollte auf die Verunreinigung abgestimmt werden, da mit steigendem, gelöstem Schmutzanteil in einer Phase die Reinigungskraft dieser nachlässt. Durch Aufbereitungsverfahren wie Ultrafiltration sind die Emulsionsreiniger vielfach wieder verwendbar. Zum Einsatz kommen sie meist, wenn eine schnelle nicht so gründliche Reinigung gefordert ist. So verwendet man sie zur Reinigung leicht verschmutzter Oberflächen mit erhöhter Korrosionsschutzanforderung, für die Passivierung nach alkalischer oder neutraler Reinigung, für die Entfettung vor der Phosphatierung oder Passivierung (Lösemittelreste schaden Phosphatierung nicht), und zur Reinigung von gelappten oder polierten Buntmetallen, die bei der alkalischen Reinigung anlaufen können.

Ungeeignet sind sie wegen des geringen Reinigungsgrads zur Reinigung von Bauteilen, die im nächsten Schritt emailliert, lackiert oder galvanisch beschichtet werden sollen [Wasser-Kohlenwasserstoff-Emulsion, 2008].

9.5.4 Pflanzenölbasierte Reiniger

Pflanzenölbasierte Reiniger stellen meist Fettsäureester von Soja-, Raps-, Kokos- oder anderen Pflanzenölen da, weil diese beständiger und weniger viskos als die unveresterten Pflanzenöle sind.

Vorteile:

- gut gegen organische Verunreinigungen
- die Viskosität der Fettsäureester entspricht der von normalen KW
- die Oberflächenspannung bei 20 [°C] entspricht der von normalen KW; bei Temperatursteigerung sinkt sie linear
- hohe Siedepunkte: ~200- 350 [°C] (je längere Ketten die Ester besitzen, desto größer sind auch die Werte für Viskosität, Oberflächenspannung und Siedepunkt)
- gut emulgierbar (sonst ist auch die Zugabe von Emulgatoren zur besseren Abwaschbarkeit mit Wasser möglich)
 - nur geringe Flüchtigkeit
 - weniger Verbrauch,
- ungefährlicher, keine Einkapselung benötigt
- Flammpunkt über 100 [°C] → Verbrennungs- und Explosionsschutzmassnahmen entfallen beziehungsweise fallen viel geringer aus (bei feinem, hochkonzentriertem Sprühnebel sind Explosionsschutzmassnahmen unter Umständen erforderlich)
- geringere Gesundheitsgefährdung und bessere Hautverträglichkeit als bei KW → Grenzwertüberwachung des Arbeitsplatzes entbehrlich
- höhere Badstandzeiten als bei KW wegen höherer Schmutzaufnahmefähigkeit und geringerer Verdunstung
- gute Biologische Abbaubarkeit
- Basis nachwachsender Rohstoff

Es verbleibt wiederum ein Restfilm auf der Bauteiloberfläche. Dies kann man als Nachteil oder auch als Vorteil werten, wenn zum Beispiel ein vorübergehender Korrosionsschutz erwünscht ist. Meist ist es aber möglich, den Film durch Spülen mit einem wässrigen System zu entfernen.

Nachteile:

- 2 bis 3 mal teurer als herkömmliche KW-Reiniger
- Einschränkung des Einsatzgebietes:
 - nur begrenzt gegen Oxidschichten oder eingebrannte Verunreinigungen verwendbar (gleich wie bei herkömmlichen KW-Reinigern)
 - verzinkte oder zinkhaltige Metalle können angegriffen werden
 - schlecht bei manchen Kunststoffen

Pflanzenöl-basierte Reiniger kommen meist gegen organische Verschmutzungen wie Schmiermittel, Schutzbeschichtungen oder Kühlschmierstoffe zum Einsatz. Sie bilden somit eine Konkurrenz zu herkömmlichen KW-Reinigern.

Für Tauch-, Sprüh- oder Wischreinigungsverfahren sind sie problemlos einsetzbar. Doch wegen der hohen Siedepunkte kann man sie, im Gegensatz zu herkömmlichen KW, nicht beim Dampfentfetten verwenden.

Die Aufbereitung findet mittels Ultrafiltration statt. Eine Destillation wäre nämlich zu energieintensiv und zudem nicht für ungesättigte Fettsäuren geeignet [Pflanzenölbasierte Reiniger, 2008].

9.5.5 Flüssiges CO₂

Dieses Sonderreinigungsmittel wird bei Drücken ab 65 [bar], meist um die 150 [bar] verwendet. Es zeichnet sich durch ein hohes Lösevermögen für organische Stoffe aus. Nach der Reinigung wird das flüssige CO₂ aus der Reinigungskammer gepumpt und mithilfe eines Abscheiders vom Schmutz befreit.

Das CO₂ wird nicht extra zum Reinigen erzeugt, sondern kann als Abfallprodukt aus anderen Prozessen gewonnen werden und verschlechtert somit nicht die CO₂ Bilanz.

Vorteile:

- die Bauteile kommen trocken aus der Reinigungskammer und benötigen keine Trocknung mehr
- Energiekosten relativ gering (Teilweise Energierückgewinnung durch Turbine möglich)
- CO₂ im Vergleich zu organischen Lösungsmitteln preiswert

Die hohen Anschaffungskosten stechen nachteilig ins Auge. Zudem müssen die Bauteile hohen Drücken aushalten. Bei Kunststoffen, vor allem Elastomeren ist dieses Reinigungsverfahren nicht geeignet.

Feine Poren oder Risse können besser mit überkritischen CO₂ gereinigt werden. Salze und andere anorganische Verunreinigungen sind nur mit geeigneten Zusatzstoffen zu entfernen.

Verwendung findet es zumeist in der Feinreinigung zur Entfernung dünner Schmutz-Schichten. Vor allem zum Entfetten große Mengen an kleinen und kleinsten Bauteilen in Körben ist dieses Verfahren effektiv und wirtschaftlich [Metallreiniger, 2009]. Für die Grobreinigung ist es aus Kostengründen nicht zu empfehlen [Flüssiges CO₂, 2008].

9.6 Feststoff-Reiniger

9.6.1 Schleifkörper

Je nach Arbeitsaufgabe wird der geeignetste Schleifkörper-Werkstoff, und die passendste Form und Größe gewählt. Ist der Schleifkörper zu groß oder besitzt er eine ungeeignete Form, kann er oftmals nicht die gewünschte Stelle erreichen und möglicherweise an falscher Stelle Material abtragen. Kantige Schleifkörper weisen einen besseren Eingriff auf z.B. Bohrungen und Nuten auf, und sind deswegen meist den runden Schleifkörperformen vorzuziehen [Schleifkörper, 2009]. Neben erwähnten existieren ebenso natürliche Schleifkörper, wie z.B. Chips aus Hartholz, Maisspindelgranulat oder Granulat aus Wallnusschalen [Kramer, 10.08.2009].

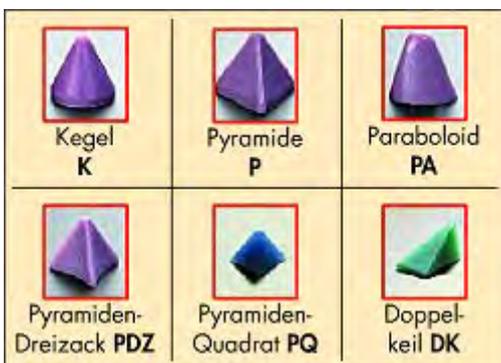


Abbildung 15: Schleifkörperformen [Schleifkörperformen, 2009]

9.6.2 Strahlreinigungsmittel

Es existieren viele unterschiedliche Strahlmittel, die man nach Form, Größe, Härte oder Herkunft unterteilen kann. Um die gewünschte Wirkung auf das zu reinigende Material zu erzielen, ohne dabei die Oberfläche zu stark zu beschädigen ist die richtige Wahl des Strahlmittels wichtig.

Hinsichtlich der Form unterscheidet man zwischen a.) runde bzw. nahezu runde Teilchen, b.) längliche splittrige scharfkantige Teilchen und c.) kantige oder kanten-gerundeten Teilchen. Runde kompakte Teilchen reinigen durch die Energie des Aufpralles, während bei länglichen scharfkantigen Teilchen, die Reinigung auf Reiben und Schneiden der Oberfläche erzielt wird. Dementsprechend ist auch die Wirkung auf die Oberfläche: Runde Teilchen erzeugen einen einheitlichen Reinigungseffekt, während die länglichen, scharfkantigen eine tiefer aufgeraute Oberfläche hinterlassen, wodurch nachfolgende Beschichtungen eine stärkere Verankerung finden können. Kantige oder kantengerundete Teilchen bilden ein Mittelmaß zwischen diesen Effekten. Sie besitzen eine schabend-glättende Wirkung, die eine leicht aufgeraute Oberfläche erzeugt.

Je größer die Teilchen sind desto größer ist auch die Kraft beim Aufprall an der Oberfläche. Deswegen sollte für eine gleichmäßige Oberfläche keine zu weite Korngrößenverteilung gewählt werden [Strahlreinigungsmittel, 2009].

9.6.3 Reinigen mit Maisspindelgranulat

Maisspindelgranulat zeichnet sich durch eine sehr hohe Absorptionsfähigkeit aus. Man kann damit zum Beispiel Wasser, Öle, Geruchs- und Farbstoffe, Kationen und anderes aufsaugen. Dass es sich dabei um ein inertes, untoxisches Material aus Reststoffen eines nachwachsenden Agrarprodukts handelt, macht das Maisspindelgranulat noch interessanter [Maisspindelgranulat, 2009].

Darum findet es in letzter Zeit immer mehr Anwendung: Zum Beispiel als Haustierstreu, Ölbindemittel, oder auch als Trocknungsmittel oder zum Polieren von Besteck. Zum Bauteil-Reinigen wird es wohl meistens als sanftes Strahlmittel verwendet, aber auch zum Polieren und leichtem Entgraten in Vibrations-Gleitschleifapparaten oder Trommeln. Mit diesen Apparaten ist ebenfalls eine Reinigung von Schmutz und Ölen möglich [Kramer, 25.06.2009].

Die Reinigung kann dabei trocken oder nass erfolgen. So bietet sich bei der Nassreinigung die Zugabe von Biodiesel als umweltfreundliches Lösungsmittel an [Krotscheck et al., 2003].

Im Allgemeinen kommt es gut zur Verwendung, wenn sowohl eine leichte abrasive wie auch absorbierende Wirkung gefordert ist. Nach dem Trocknen kann das Granulat meist wiederverwendet werden.

Als Strahlmittel ist es laut Krotscheck et al. anderen biogenen Stoffen überlegen. Die Reinigung ist dabei für das Bauteil viel schonender als beim Strahlen mit Sand [Krotscheck et al., 2003]. Es kann auch mehrmals verwendet werden, da es gegen Bruch widerstandsfähig ist [Kramer, 26.06.2009]

Oft kommt es als letzter Produktionsschritt zur Anwendung, z. B. in (beheizten) Vibrationsfinishern. Neben dem Reinigungseffekt ist das Entfallen eines zusätzlichen Trocknungsschrittes ein großer Vorteil. Im Gegensatz zur wässrigen Reinigung fällt hier kein Abwasser und somit keine Entsorgungskosten an. Sofern die zu entfernenden Öle biologisch abbaubar/thermisch verwertbar sind, handelt es sich bei der Reinigung mit Maisspindelgranulat um ein sehr umweltfreundliches Verfahren, das einen Agrar-Reststoff optimal ausnützt und zur Energie-/Wärmegewinnung beitragen kann.

Maisspindelgranulat kann allerdings nicht zum Entfetten verwendet werden, wenn eine sehr hohe Oberflächenreinheit gefordert ist oder die Teile geklebt werden müssen. Im Zuge der Arbeiten am Projekt EFOR wurden ebenso Versuche zur erzielbaren Reinheit bei der Entfettung mittels Maisspindelgranulat durchgeführt.

Mit Maisspindel wird meist der entkörnte Maiskolben bezeichnet. Sie besteht aus einem inneren Kern, sowie einen hölzernen und äußeren Ring. Der innere Kern stellt den weichsten und leichtesten Anteil (2 Gew%), der hölzerne Ring die härteste und schwerste Komponente (60 Gew%) dar. Alle drei Komponenten besitzen absorptive Eigenschaften.

Maisspindelgranulat wird aus dem hölzernen Ring des Maiskolbens gewonnen, da die anderen Komponenten für viele Anwendungen wie Strahlen zu leicht sind. Es besitzt eine Härte von 4,5 nach Mohs-Härteskala sowie eine Schüttdichte von etwa 537 [kg/m³]. Selbst wenn eine Entstaubung des Maisspindelgranulats erfolgt, so bleibt doch ein geringer Staubanteil im Granulat enthalten.

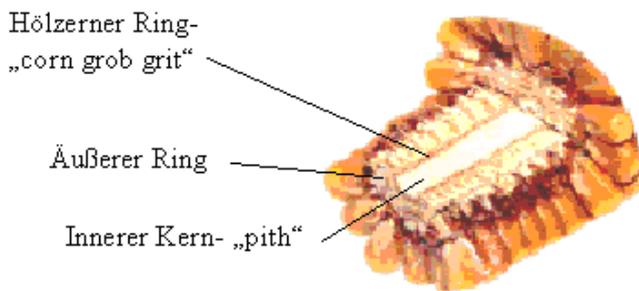


Abbildung 16: Bestandteile der Maiskolbens [Maisspindelgranulat, 25.06.2009]

Krotscheck et al. untersuchten einige Maissorten auf ihre Absorptionsfähigkeit. Am besten haben dabei die gemahlene Spindeln der Sorten Wollsdorf und Benicia abgeschnitten. Die Absorptionsfähigkeit steigt ebenfalls mit dem Mahlgrad. So sind Korngrößen von einem halben bis einigen Millimetern üblich [Krotscheck et al., 2003].

9.7 Technologien zur Waschbadaufbereitung / Störstoffentfernung

Nachstehende Graphik gibt einen Überblick über die im folgenden Kapitel behandelten Verfahren, und ihrer Einsatzmöglichkeiten: Entfernung von Feststoffen, „freien“ (leicht aufschwimmenden) und dispergierten Ölen (bis zu Tropfendurchmesser von 20 µm) sowie Spaltung von Emulsionen, die aber nicht unbedingt mit Emulgatoren stabilisiert sein müssen. Oft überschneiden sich die Einsatzbereiche der verschiedenen Verfahren.

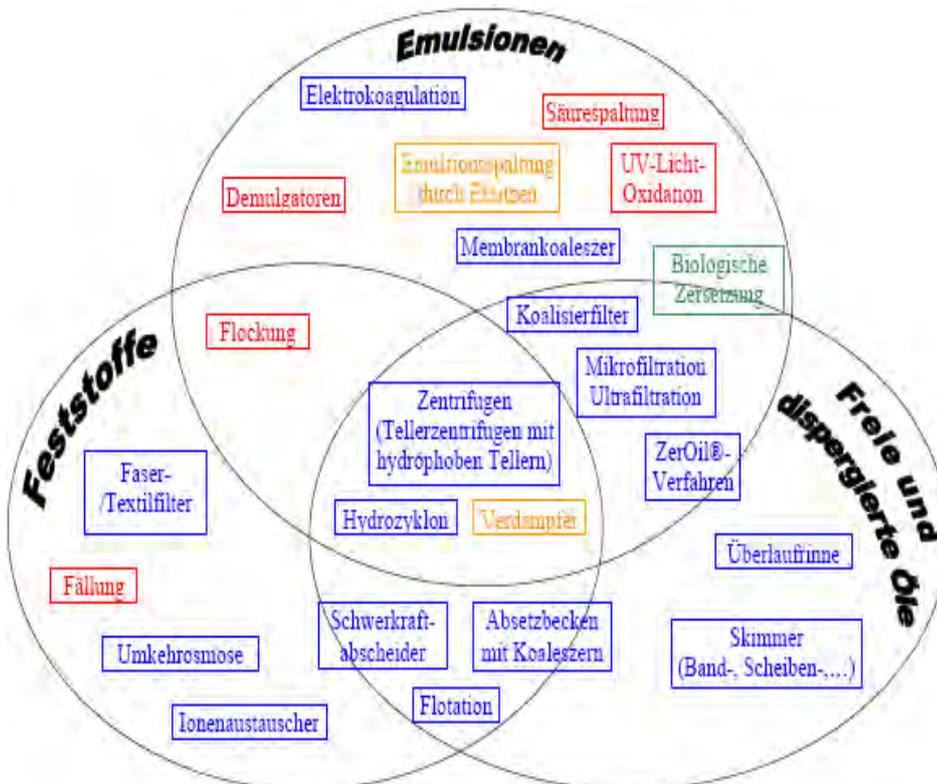


Abbildung 17: Aufbereitungsverfahren bei wässrigen Systemen (blau: physikalische Verfahren; rot: chemische Verfahren; grün: biologische Verfahren)

9.7.1 Filtration

Sieb bzw. Filtereinrichtung werden meistens zum Schutz von Umwälzpumpen gegen Späne und andere Partikel eingesetzt. Sie dienen aber genauso einfach und wirksam der Badpflege, da sie die Anreicherung von Fremd-Metallkationen verhindern, selbst wenn sie diese nicht abfiltern. Werden nämlich Späne und Pigmentverschmutzungen nicht aus den Reinigungsbädern entfernt, können die Reinigungschemikalien sie angreifen und Ionen herauslösen [Brunn et al., 1998].

Man verwendet Gleichstromfiltrationsanlagen („death-end“- Filtration), die Zulaufströmung verläuft also parallel zur Permeatströmung, und ein Filterkuchen baut sich auf. Der angesammelte Schmutz wird entweder händisch oder automatisch durch eine Rückspüleleitung entleert. Von Zeit zu Zeit sollte der Filter gewechselt werden, da sich Schmutzpartikel auch im Filtermaterial einlagern.

Typische Bauweisen stellen Band-, Kammer-, Kerzen- oder Sackfilter dar, als Filtermaterial werden Fasern, Textilfasern, Papier oder Metallgewebe verwendet [Landl, 1993].

Anwendungsbereich: Abtrennung von dispergierten Feststoffen im typabhängigen Bereich von 1 – 1500 [µm]. Mit Spezialanwendungen sind sogar bis 0,1 [µm] Partikel abtrennbar [Planasch, 2003].

9.7.2 Hydrozyklon

Hydrozyklone haben sich bei größeren Spritzanlagen zur Entfernung von Partikeln bewährt [Jelinek et al., 1998]. Allerdings kann man mit ihnen nur Partikeln mit einem Durchmesser von größer 5 [µm] abtrennen [Neuper et al., 2004]. Bei Verwendung von nur einem Hydrozyklon sind äußerst geringe Abscheideleistungen bei gleichzeitig hoher Eindickung erreichbar.

Theoretisch sind Hydrozyklone auch zur Trennung von Emulsionen (z. B. in der Solventextraktion oder Abwasserreinigung) einsetzbar, wobei das richtige Dimensionieren schwierig ist. Durch die Scherwirkung verändert sich nämlich die Tropfengrößenverteilung, deren Kenntnis für die Dimensionierung ausschlaggebend ist [Vauk et Müller, 2000]. Laut einigen Firmenangaben werden heutzutage Tröpfchengrößen bis zu etwa 20 [µm] fast vollständig abgeschieden. Ab einem Tröpfchendurchmesser von kleiner gleich 5 [µm] sinkt die Abscheideleistung signifikant. Feststoffe, Gase und Chemikalien verschlechtern den Trennprozess [Bennett et Williams, 2004].

9.7.3 Fällung

Die Fällung stellt ein chemisches Verfahren zum Entfernen gelöster Phosphate oder Schwermetalle wie Chrom, Eisen, Zink und Kupfer aus einer wässrigen Lösung dar.

Dabei werden die gelösten Metallkationen oder die Nichtmetall-Anionen durch Zugabe geeigneter Ionen gegensätzlicher Ladung in schwer lösliche Verbindungen umgewandelt, sie „fallen aus“ und sedimentieren [Fällung, 2009].

9.7.4 Flockung

Sie eignet sich zur Entfernung organischer wie auch nicht-organischer kleiner Partikel, und kann selbst zur Aufspaltung von O/W Emulsionen verwendet werden. Man versteht unter der Flockung die Bildung sedimentierbarer Niederschläge durch Aggregation kleinster Teilchen. Je nach Art der zugegebenen Hilfsstoffe unterscheidet man zwischen Koagulation und Flockulation. Bei der

Koagulation werden durch Elektrolyte elektrostatische Abstoßungskräfte aufgehoben und interpartikuläre Wechselwirkungen aufgebaut, während bei der Flockulation langkettige organische Moleküle als „Haftvermittler“ dienen. Letzteres ist meist die kostengünstigere Variante [Vauk et Müller, 2000; Siebenhofer, 2006].

Bei Cheryan wird von einer Möglichkeit berichtet, stabil emulgiertes Öl mit Hilfe der Flockung zu entfernen. Dabei werden aber nicht direkt die Öltröpfchen zur Aggregation und Sedimentation gebracht, sondern zugegebene Kationen, die Öl adsorbieren. Die einzelnen Schritte finden dabei mal im sauren und mal im basischen Milieu statt [Cheryan et Rajagopalan, 1998]. Es sei darauf hingewiesen, dass Öl zwar aus der Flüssigkeit entfernt wurde, nun aber im wässrigen Schlamm vorliegt, der noch entwässert werden muss.

Es scheint sich um eine aufwendige Methode zur Emulsionsspaltung zu handeln, die wohl zur Abwasseraufbereitung und nicht zur Badaufbereitung verwendet werden wird.

9.7.5 Flotation

Unter Flotation versteht man das Austragen dispergierter fester oder flüssiger Teilchen aus einer flüssigen, kontinuierlichen Phase mittels aufsteigender Gasblasen. Die zu entfernenden Partikel oder Öltropfen lagern sich dabei an die Gasbläschen an und steigen mit ihnen an die Bad-Oberfläche. Von der Oberfläche der Flüssigkeit können sie dann einfach abgeschieden werden.

Ursprünglich wurde die Flotation zur Erzsartierung angewendet, heute hat sie aber in fast alle Gebiete des Feststoffsartierens Eingang gefunden. Zur Aufbereitung von Bädern kommt sie vor allem bei wässrigen Reinigern zum Entfernen von hydrophoben Partikeln oder Öl zum Einsatz, da das hydrophobe Verhalten die Löslichkeit im Wasser senkt und somit im Gas erhöht. Deswegen werden auch oft Chemikalien wie Tenside zugesetzt, um die Hydrophobie hydrophiler Stoffe zu erhöhen oder zu erzeugen [Vauk et Müller, 2000]. Mit Tensiden stabilisierte Öltropfen besitzen allerdings eine hydrophile Außenschicht und lassen sich daher mit dieser Methode nicht spalten. Sie werden zuerst mit Chemikalien und/oder Erwärmen de-emulgiert und dann flотиert [Cheryan et Rajagopalan, 1998].

Für Feststoffe anwendbar ist dieses Verfahren, wenn die Durchmesser der Feststoffpartikel mehr als 50 µm betragen. Für kleinere Partikel muss man extra Hilfsstoffe größer 50 [µm] zugeben, an denen dann die kleineren Partikeln adsorbiert werden können (Ultraflotation) (Vauk et Müller, 2000). Allzu schwere Partikel sind auch nur schwierig abtrennbar.

Um die Stabilität der Gasblasen zu gewährleisten, muss man die Bläschen entweder klein halten oder Schaumbilder zugeben. Je nach Art der Gasbläschen-Erzeugung kann man die Flotation weiter unterteilen:

Bei der Entspannungs-Flotation wird die Flüssigkeit unter Druck gesetzt und mit Gas (meist mit Luft) gesättigt. Dann wird der Druck schlagartig vermindert und durch die resultierende niedrigere Sättigungsgrenze bilden sich viele Gasbläschen, zumeist direkt an den Öltröpfchen. [Jelinek et al., 1999]. Dadurch kann man kleinere Öltröpfchen aus der Badflüssigkeit entfernen, als es mit einem Absetzbecken möglich wäre [Cheryan et Rajagopalan, 1998].

Bei der Elektro-Flotation entstehen durch elektrolytische Spaltung des Prozesswassers Sauerstoff und Wasserstoffbläschen, die dann die Öltröpfchen und den suspendierten Schmutz nach oben

treiben. Man muss allerdings wegen Gefahr der Reaktion der beiden Gase (Knallgasreaktion) Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen treffen [Jelinek et al., 1999].

Außerdem besteht noch die Möglichkeit, das Gas (meist Luft) direkt einzublasen. Entweder findet mittels Düsen eine Direktbegasung statt, oder das Gas wird durch ein Rührwerk in der Flüssigkeit verteilt [Flotation, 2009].

9.7.6 Zentrifugen

Das Trennkriterium ist ebenso wie bei der Schwerkraftabscheidung das spezifische Gewicht, nur kann anhand der bis zu 4 Zehnerpotenzen größeren Kraft schneller und genauer getrennt werden. Voraussetzung zur Abscheidung ist ein Dichte-Unterschied von mindestens 2% [Fresner et al., 2006, S.96].

Mit manchen Zentrifugen (z.B. Rohrzentrifugen) erreicht man eine Abscheideleistung bis zu Partikelgrößen von 0,5 [µm] [Vauk et Müller, 2000] oder 0,1 [µm] [Neuper et al., 2004].

Man kann entweder nur Feststoffe aus einer Suspension entfernen, oder zwei flüssige Phasen (z. B. einer Emulsion) trennen, oder mit 3-Phasen-Zentrifugen beides. Letztere sind deswegen zur Badaufbereitung von Entfettungsbädern empfehlenswert.

Der Feststoff wird heutzutage meist vollautomatisch ausgetragen (selbst entleerende Zentrifugen), seltener manuell.

Am häufigsten werden Tellerzentrifugen, auch Separatoren genannt eingesetzt. Verwendet man Teller geeigneter Oberflächenbeschaffenheit, so hat man einen Platten-Koaleszenzabscheider integriert. Neben dem spezifischen Gewicht ist dann ebenso das Haftungsvermögen an hydrophoben Grenzflächen zur Trennung ausschlaggebend [Zentrifugen, 2009].

Es gelingt Restölgehalte von 0,5 – 1 [g/l] zu erreichen und eine fast vollständige Abtrennung der festen Verunreinigungen. Nach Lyko et al. sollte der Ölgehalt im aufbereiteten Entfettungs-Reiniger aber unter 100 [mg/l] betragen [Lyko et al., 1994], wodurch dieses Verfahren für die Entfettungsbadreinigung unzureichend wäre. Trotzdem kann laut Jelinek et al. mit Zentrifugen eine 10-fache Verlängerung der Badstandzeit erreicht werden [Jelinek et al., 1999]. Im Vergleich zu Hydrozyklonen und Absetzbecken mit Plattenkoaleszer stellen sie hinsichtlich Abscheideleistung das effizienteste Ölabscheideverfahren dar, gefolgt vom Hydrozyklon [Van den Broek et Van der Zande, 1998]. Die wässrige Phase bleibt nahezu unverändert, allerdings ist ein Nachschärfen reinigungsaktiver Substanzen (z. B. Tenside) in der Regel erforderlich [Zentrifugen, 2009]. Das abgezogene Öl enthält meist nur wenig Wasser (5-10%) [Landl, 1993].

9.7.7 Ionenaustausch-Verfahren

Zur Enthärtung und Entsalzung oder zur Entfernung unerwünschter Metall-Ionen aus dem Spülwasser ist es möglich Ionenaustauscher einsetzen. Diese können zu einer deutlichen Standzeitverlängerung der Spülbäder führen.

Zum Schutz der Ionenaustauschharze müssen der Mischbett-Ionenaustauscher-Patrone noch Feinfilter vorgeschaltet werden [Jelinek et al., 1999]. In den Patronen liegen die Harze meist in Form kleiner Kügelchen oder als Granulat in der Korngröße von 0,3 bis 1,2 mm vor. Je nach Art der Ionenaustauscher bauen die Harze dann sämtliche Kationen in sich ein und geben Wasserstoff-

Ionen frei bzw. tauschen sie Anionen gegen Hydroxid-Ionen [Landl, 1993]. Wasserstoffionen und Hydroxidionen reagieren spätestens im Bad zu H₂O.

Es handelt sich allerdings um ein unverhältnismäßig teures Verfahren, da die Harze wegen der begrenzten Aufnahmefähigkeit oft mit Chemikalien regeneriert werden müssen. Dies geschieht am besten im Gegenstromverfahren, wobei bei der Regeneration auch immer Abwasser anfällt [Jelinek et al., 1999].

Sind in der Spülflüssigkeit teure Metalle enthalten (Metallisierungsindustrie), so können selektive Ionenaustauscher auch zur Rück-Gewinnung derselben eingesetzt werden. Zum Beispiel kann in der (kupferhaltigen) Leiterplattenproduktion die verbrauchte Regenerierlösung des selektiven Kationentauscher mittels Elektrolyse zur Kupferabscheidung verwendet werden oder direkt zum Neuansatz des Verkupferungsbades [Gräf, 1998].

Einsatzgebiet: Spülwasserreinigung, VE-Wasser Produktion, Entfernen von Ionen

9.7.8 Schwerkraftverfahren

Schwerkraftverfahren zeichnen sich durch einen geringen anlagentechnischen Aufwand, einen äußerst niedrigen Energieeinsatz, aber einer großen Wirkung aus. Sie sind deswegen, wenn einsetzbar, immer zu empfehlen.

Meistens kommen sie bei wässrigen Reinigern zur Anwendung. Gelöste Substanzen, wie z.B. Öle in Lösemittelreinigern oder Salze in wässrigen Reinigern, sind allerdings mit diesen Verfahren nicht entfernbar. Ebenso wenig lassen sich Emulsionen durch die Schwerkraft aufspalten. Allerdings eignen sich Schwerkraftverfahren sehr gut bei Verwendung von demulgierenden Reinigern oder Demulgatoren. Dabei werden die Öltröpfchen nach einiger Zeit wieder von der Emulgator-Schicht befreit und können koagulieren. Die größeren Tropfen sind dann im Schwerefeld abtrennbar, sie sammeln sich an der Flüssigkeitsoberfläche an und können einfach abgezogen werden [Schwerkraftverfahren, 2009].

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die vorhandenen Reinigersubstanzen nicht durch die Schwerkraft abgeschieden werden und somit im Wasser verbleiben. Ausgenommen sind natürlich die an den Ölen haftenden Tenside.

Das verunreinigte Wasser sollte möglichst schonend in den Abscheider geführt werden, um Öltröpfchen nicht durch große Scherkräfte zu zerteilen, wie sie z. B. in einer Kreiselpumpe auftreten. Dadurch könnten Emulsionen erzeugt werden [Robinson et Falk, 2000]. Laut *ACS Liquid-Liquid Coaleszer Design Manual* wird durch Kreiselpumpen die Tropfengröße auf 10 – 200 [µm] verkleinert [N.N., ACS liquid-liquid..., 2003]. Wenn die Flüssigkeit nicht auf Grund der Schwerkraft zum Abscheider fließen kann, werden Verdrängerpumpen wie Membran- oder Schraubenpumpen empfohlen. Auch Ventile, die hohe Scherkräfte erzeugen, sind zu vermeiden [Oilandwater, 2009].

9.7.9 Absetzbecken

Absetzbecken werden zur Entfernung aufschwimmender Öle und sich absetzender Verunreinigungen (z. B. Späne, Metallstaub) eingesetzt. Sie können kontinuierlich (meist über einen Ölüberlauf im Reinigungsbecken) oder periodisch (z. B. Wochenende) befüllt werden. Eine längere Verweilzeit ermöglicht das Aufsteigen und Absinken der zu entfernenden Substanzen.

Manchmal unterstützt man diese Vorgänge durch chemische Hilfsstoffe, wie z. B. Flockungsmittel oder Demulgatoren. Allerdings können bei einer auch noch so langen Verweilzeit nicht alle dispersen Partikel aus der flüssigen Phase abgeschieden werden, da die Schwerkraft zu schwach ist und bei sehr kleinen Teilchendurchmesser die Impulsstöße anderer Moleküle ein Sinken oder Aufsteigen verhindern (Brown'sche Molekularbewegung). Der Grenzkorndurchmesser lässt sich über die Stokes-Gleichung berechnen [Siebenhofer, 2006]:

$$d_p = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot \frac{h}{t} \cdot \frac{1}{\phi}}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}}$$

d_p ..Grenzkorndurchmesser

h/t .. Absetzweg dividiert durch Verweilzeit

η ..dynamische Viskosität des Kontinuums

ρ_1 ..Dichte der Teilchen, ρ_2 ..Dichte des Kontinuums

ϕ ..Korrekturfaktor für Nichtidealitäten, wie z. B. „hindered settling“

Die sedimentierten Schlämme sind ohne weitere Entwässerung meist nicht deponierfähig [Landl, 1993].



Abbildung 18: Absetzbecken [Absetzbecken, 2009]

9.7.10 Absetzbecken mit Koaleszer

An hydrophoben Kunststoffoberflächen bleiben die in der Flüssigkeit verteilten Öl-Tröpfchen haften, fließen zusammen, vergrößern sich dadurch und steigen infolge der geringeren Dichte auf. Oft werden mehrere schräg gestellte Platten als Koaleszer verwendet, oder in Hülsen befindliche Füllkörper-Betten (z.B. Hohlkugel- Schüttungen) [Jelinek et al., 1999, S.89].

Bei Plattenkoaleszern wird der Absetzweg der kleinen Öltropfen auf einige Millimeter bis Zentimeter verringert, wodurch man nach dem Stoke'schem Gesetz viel kleinere Tropfen während einer realistischen Verweilzeit aus der Flüssigkeit abtrennen kann, als es mit reinen Absetzbecken möglich wäre. Die Koaleszenzbleche kommen in unterschiedlichen Formen vor: Als ebene Platten, als ebene „dachförmige“ Platten wie in, oder als gewellte Platten. Obwohl manche Hersteller behaupten, eine bessere Ölabscheidung mit quer-angeströmten gewellten Platten erzielen zu können, ist das weder theoretisch verankert noch in praktischen Tests nachgewiesen worden [Stewart et Arnold, 2008]. Für feststoffbeladene Ströme sind gewellte Platten eher ungeeignet. Oft werden die flachen oder gewellten Platten geneigt eingebaut, um ein Verstopfen durch sedimentierte Feststoffpartikeln zu vermeiden.

Viele Absetzbecken mit Koaleszenzblechen haben am Behälter-Boden zusätzliche Auslass-Stutzen angebracht, um sedimentierte Feststoffe einfacher auszutragen. Sie können also neben den zwei flüssigen Phasen eine Feststoffphase abtrennen und werden daher manchmal 3-

Phasen-Separatoren genannt. Bei anderen Absetzbecken mit Plattenkoaleszern sedimentieren Feststoffe ebenfalls, diese müssen aber von Hand ausgetragen werden.

Sowohl die Anschaffungskosten als auch der Reinigungsgrad sind höher als bei normalen Absetzbecken [Landl, 1993]. Die Abscheideleistung mit Koaleszern reicht bei dispergiertem Öl bis zu einem Durchmesser von ca. 20 [µm] [Frericks et al., 1997; Cheryan et Rajagopalan, 1998]. Wobei dies wohl nicht für Plattenkoaleszer gilt, denn Boam nennt einen effektiven Abscheidebereich bei Platten-Koaleszern von Tropfen größer als 100 [µm], während mit Schütt-Koaleszern Tropfen bis zu 25 [µm] gut abgeschieden werden können [Boam, 2003]. Stewart und Arnold geben hingegen als Abscheidegrenze für Öl aus Wasser mittels Plattenkoaleszern eine Öltröpfengröße von 30 [µm] an [Stewart et Arnold, 2008].

Hierbei ist noch anzumerken, dass Boam tensidfreie Gemische untersuchte. Vorhandene Tenside verschlechtern die Abscheidung, weswegen Plattenkoaleszer als nicht bzw. kaum geeigneter Trennapparat für stabile Emulsionen gelten [Stewart et Arnold, 2008].

9.7.11 Überlaufrinnen

Überlaufrinnen stellen sehr einfache Abscheider bei wässrigen Wasch- oder Spülbädern dar. Neben dem aufschwimmenden Öl wird aber oft viel Badflüssigkeit mit ausgetragen, die wieder ergänzt werden muss. Zudem ist der verdünnte Öl-Wasser-Überlauf extra aufzubereiten [Überlaufrinnen, 2009]. Schwimmende Überlaufrichter sind bei Badbewegung (z. B. bei Tauchbecken) deswegen besonders geeignet.

Überlaufrinnen sind ebenso wie Skimmer strenggenommen keine Badaufbereitungsverfahren, sondern nur wirksame Mittel um Ölanreicherungen an der Badoberfläche zu verhindern.

9.7.12 Skimmer

Um aufschwimmendes Öl von der Oberfläche zu entfernen, setzt man oft Skimmer ein. Sie werden in den verschiedensten Formen angeboten, wie Bänder, Ketten, Schläuche oder Scheiben. An diesen bleibt der Ölfilm haften und wird an anderer Stelle von diesen wieder entfernt. Das Öl liegt also in konzentrierter Form vor und muss nicht weiter entwässert werden. Skimmer sind vor allem bei stärkerem Öleintrag sehr effektiv [Skimmer, 2009].

9.7.13 Demulgatoren

Demulgatoren sind chemisch wirksame Substanzen zur Emulsionszerstörung. Sie müssen sehr gut auf Art der Verschmutzung und auf die Tenside bzw. Emulgatoren eingestellt werden. Wegen der großen Anzahl an Emulgatoren gibt es daher nahezu gleichviel verschiedene Demulgatoren [Heusch, 2002, S.20]. Außerdem sollten sie die Reinigungswirkung nicht beeinträchtigen, falls sie zur Aufbereitung von Wirkbädern eingesetzt werden [Jelinek et al., 1999, S. 90].

Sie beruhen entweder auf der Entladung des hydrophilen Endes der Tenside, auf Verdrängung oder gar Wegnahme der Emulgatoren oder auf eine Kombination dieser Mechanismen.

Bei der Entladung des hydrophilen Teils der Tenside gibt man gegensätzlich geladene Substanzen zu, die sich an die Tenside anlagern. Verwendet man zum Beispiel anionische Tenside zum Reinigen, so mischt man kationische Stoffe zu. Ziel ist es immer, die Ladung bzw. Polarität der Tensidschicht oder der Öltröpfchen aufzuheben, wodurch man unpolare Tröpfchen im

Wasser und somit eine destabilisierte Emulsion erhält. Die Tröpfchen können jetzt leicht zusammenfließen. Angewandt wird dieses Prinzip zum Beispiel bei der Säurespaltung. Die gegensätzlich geladenen Substanzen stellen hierbei die H_3O^+ -Ionen da. Bei der Salzsäurespaltung egalieren hingegen Metallkationen die Ladung der Tenside. Man kann aber auch organische Spalter verwenden. Diese im weitesten Sinne nur gegensätzlich geladenen Emulgatoren belasten die wässrige Phase nicht, da sie in der organischen Phase gelöst bleiben. Der große Nachteil liegt allerdings in der notwendigen genauen Dosierung. Gibt man nämlich zuviel Spalter zu, wird durch die gegensätzlich geladenen Emulgatoren die Emulsion stabilisiert.

Durch Zugabe von kationischen Tensiden zu anionischen Tensiden kann es aber auch zur Komplexbildung und Ausfällung kommen, was einer Wegnahme der Tenside entspräche [Heusch, 2002].

Man hat herausgefunden, dass in der kontinuierlichen Phase lösliche Tenside eine Emulsion bei weitem mehr stabilisieren als in der dispersen Phase lösliche. Das macht man sich auch bei der chemischen Spaltung von Emulsionen zunutze, durch die Beimengung von in der dispersen organischen Phase gut löslichen und schnell diffundierenden Tensiden. Diese Demulgatoren nehmen dann die Plätze der ursprünglichen Tenside ein, wodurch es öfter zur Koaleszenz kommt [Ivanov et Kralchevsky, 1997]. Für genauere Informationen zu diesem Prozess und der Stabilität der Emulsionen im Allgemeinen sei auf die Literatur verwiesen, wie z. B. „Stability of Emulsions under equilibrium and dynamic conditions“ von Ivanov et Kralchevsky, 1997.

Schlussendlich sei noch bemerkt, dass die Stabilität von Emulsionen und die Mechanismen dahinter ein nahezu unerschöpfliches Forschungsgebiet darstellen, welches hier nur am Rande behandelt werden kann [Ivanov et Kralchevsky, 1997]. Gleiches muss dann auch für die Beeinflussung (z. B. durch Demulgatoren) solcher Mechanismen gelten.

Die Öl-Verschmutzungen und Tenside in der wässrigen Flüssigkeit müssen bekannt sein, sodass man den Demulgator darauf abstimmen kann. Bei Fertigungsprozessen stellt dies aber meist kein Problem dar.

Werden sie zur Aufbereitung von Entfettungsbädern verwendet, so sind Demulgatoren vorteilhaft, die keine feste Bindung mit den waschaktiven Tensiden eingehen und sich nicht nachteilig auf den folgenden Reinigungsprozess auswirken. Das trifft auf jeden Fall auf Demulgatoren zu, die die Tenside einfach verdrängen und mit der organischen Phase abgeschieden werden.

Bei der Aufbereitung von Spülbädern ist die Erhaltung der Tenside uninteressant, sofern sie nicht im Entfettungsbad wiederverwendet werden sollen. Sind hohe Oberflächen-Reinheiten gefordert, dürfen keine hohe Salz- oder andere Partikelkonzentrationen im Spülwasser herrschen. Darum scheidet hier die Säurespaltung (und die veraltete Salzsäurespaltung) aus. Bei der Abwasserbehandlung hingegen ist die Entfernung frei schwimmender Tenside ein positiver Nebeneffekt, da sie sich negativ auf Organismen auswirken und der CSB-Wert durch die effektive Abtrennung gesenkt wird.

9.7.14 Demulgierende Reiniger

Hier sei noch einmal auf demulgierende Reiniger verwiesen, die ausführlicher im Kapitel wässrige Reiniger behandelt wurden. Auch wenn es sich genau genommen um kein

Aufbereitungsverfahren handelt, so ist durch das nur zeitweise Emulgieren des Öls mittels Tensiden eine deutliche Bad-Standzeitverlängerung erreichbar. Zudem gehen die Tenside nicht verloren, sondern sind zumindest theoretisch wieder verwendbar.

In der Praxis verschwindet allerdings die demulgierende Eigenschaft demulgierender Reiniger oft nach einiger Zeit. Dies liegt vor allem an den stabilisierenden und emulgierenden Additiven der Bearbeitungsflüssigkeiten (KSS, Öle). Breuer empfiehlt in diesen Fällen statt der Verwerfung des Reinigungs-Bades die Zugabe von externen Demulgatoren um die rasche Ölabtrennbarkeit wieder zu gewährleisten [Breuer, 2008].

9.7.15 UV-Licht-Oxidation

Ein weiteres chemisches Verfahren zur Entfernung organischer Verschmutzungen stellt die Zerstörung des organischen Schmutzes dar.

Das zugegebene Wasserstoffperoxid (H_2O_2) wird mittels UV-Licht in Hydroxylradikale gespalten, die wiederum Kohlenwasserstoffketten oxidieren und dabei spalten. Wenn genügend Radikale dieses starken Oxidationsmittels im Wasser vorhanden sind, kann der organische Schmutz vollständig in CO_2 und H_2O abgebaut werden [UV-Licht Oxidation, 2009].

Bei den notwendigen hohen Konzentrationen kommt es allerdings zum Eigenzerfall des Wasserstoffperoxids und somit zu einem Ausbeuteverlust. Da die Hydroxyl-Radikale völlig ungerichtet sind [Siebenhofer, 2006], werden bei dieser Methode ebenso die waschaktiven Tenside angegriffen und zerstört.

Es existieren auch andere Oxidationsverfahren, z.B. mit Ozon gestartete. Gebräuchlich sind Oxidationsverfahren in der Abwasserreinigung vor allem um giftige Anionen (z. B. Cyanid) zu zerstören bzw. biologisch schwer abbaubare Substanzen dem biologischen Abbau zugänglich zu machen.

Vor allem bei trüben Lösungen, in der Feststoffe viel Strahlung adsorbieren, handelt sich um ein kostspieliges Verfahren.

9.7.16 Säurespaltung

Die Säurespaltung wird verwendet um emulgiertes Öl aus wässrigen Medien mit neutralen oder basischen pH- Wert zu entfernen.

Durch Zugabe geeigneter Säuren stellt man einen pH-Wert von 2,5 ein. Die H_3O^+ Ionen neutralisieren dabei die anionische Tensidschicht um die Öltröpfchen [Gräf, 1998]. Diese können nun einfach zusammenfließen, es entstehen größere Öltropfen, die aufschwimmen. Danach muss die saure Lösung wieder neutralisiert werden, dies wird meist mit Kalkmilch durchgeführt. Unter Zuhilfenahme von Flockungshilfsmitteln wird dabei verbliebenes Öl adsorbiert und ausgelesen. Der ausfallende Schlamm muss unter Umständen weiter behandelt werden, wenn er z.B. einen zu hohen organischen Anteil aufweist, oder wird entwässert, um die Abfallmenge zu reduzieren [Säurespaltung, 2009]

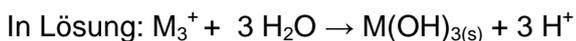
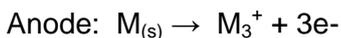
Die Spaltung mit Salzen anstatt mit Säuren ist nicht so effektiv und zählt selbst in der Abwasserreinigung nicht mehr zum Stand der Technik [Gräf, 1998].

Bei stabilen Emulsionen reicht die Säurespaltung allein nicht aus. Man muss es mit anderen Verfahren kombinieren, wie z. B. Koaleszern oder Temperaturerhöhung [Gräf, 1998].

Die Neutralisation kann eine Aufkonzentrierung des Wassers an Salzen verursachen, weswegen die Säurespaltung (und auch Salzspaltung) nicht zur Regeneration von Reinigungs- oder Spülbädern geeignet ist [Landl, 1993].

9.7.17 Elektrokoagulation

Dieses Verfahren ähnelt der Koagulation (siehe Flockung), allerdings müssen bei der Elektrokoagulation keine chemischen Hilfsstoffe zugesetzt werden. Das Koagulationsmittel wird durch Auflösen einer Opferanode (aus Aluminium oder Eisen) bereitgestellt. Die gelösten Metallelektrolyte unterstützen die Spaltung der Emulsion durch Entladung der Öltröpfchen, sodass diese zusammenfließen können. Diese koagulierten Öltröpfchen werden von den entstehenden Metall-Hydroxid-Partikeln eingeschlossen oder an ihren großen spezifischen Oberflächen adsorbiert. Die Partikel werden dann durch Sedimentation oder Flotation aus dem Wasser entfernt. Für die Flotation kann man die an der Kathode gebildeten Wasserstoffbläschen verwenden.



In einem optimierten Versuch wurde eine Reduktion der Trübheit um 99 [%] und des CSB- Wert um 90 [%] erreicht. Ausgangslösung war dabei eine 5 %ige Schneidöl-Wasser-Emulsion. Das kommerzielle Schneidöl enthielt dabei über 10 [%] Tenside.

Neben dem Wegfallen chemischer Zusätze zeichnet sich dieses Verfahren durch eine einfache Anlage und Betrieb, sowie geringe Investitions- und Betriebskosten aus [Tir et al., 2008]. Es eignet sich auch zur Aufspaltung von Emulsionen mit einer geringen Dichtedifferenz zwischen den beiden Phasen.

Als Nachteil ist der anfallende Metallschlamm zu nennen [Cheryan et Rajagopalan, 1998], obgleich die Schlammengen geringer als bei gewöhnlicher Flockung sind [Mollah et al., 2001]. Es ist davon auszugehen, dass freie, anionische Tenside zumindest teilweise von den positiv geladenen Metallionen adsorbiert werden und somit aus der Lösung entfernt werden. Das Verfahren muss mit der Reinigerrezeptur abgestimmt werden.

Anwendungsgebiet: Kontinuierliche Aufbereitung emulgierender Systeme [Schebek et al., 1994]. So zeigten z.B. Gidaracos et al., dass sowohl anionisch sowie auch nichtionisch stabilisierte Bohr- und Schneidöl-Emulsionen gespalten werden können, wenngleich es bei anionischen etwas schneller und vollständiger funktionierte [Gidaracos et al., 1989].

Es verbleibt ein Restölgehalt von mehr als 50 [mg/l] im Wasser [Schebek et al., 1994]. Dies wäre laut Lyko et al. für die Badaufbereitung ausreichend, solange man unter 100 [mg/l] bleibt [Lyko et al., 1994]. Um eine höhere Reinheit zu erzielen, muss man andere Verfahren wie z.B. UF nachschalten.

Bei geladenen Tröpfchen-Oberflächen (vor allem bei ionischen Tensiden, nicht bei nichtionischen) [Penth, 1991] wandern die Öltröpfchen auch ohne Hilfsstoffe im elektrischen Feld zur Elektrode, wo sie dann koagulieren. Die Elektrophorese allein dauert allerdings lange und benötigt eine hohe

Spannung und Frequenz [Frericks et al., 1997] sieht zudem die Anwendung nur bei w/o-Emulsionen), weswegen gewöhnlich die oben beschriebenen Induktionskeime zur Unterstützung der Emulsionsspaltung erzeugt werden. So benötigt ein solches Verfahren zur Aufbereitung von Entfettungsbädern nur mehr rund 5 [kW] pro Stunde und Kubikmeter [Gillar, 1994].

9.7.18 Koalisierfilter

Man unterscheidet zwischen 5 Arten von Koaleszenzabscheidern. Neben den bereits besprochenen, gewöhnlichen Koaleszenz-Platten-Abscheidern und Koaleszenz-Schüttungen (siehe: „Absetzbecken mit Koaleszer“), gibt es ebenso fasrige Koalisierfilter sowie Koalisiermembranen, mit denen noch kleinere Tropfen abgetrennt werden können [Boam, 2003], sowie ein neues, einfaches Verfahren namens ZerOil®.

Bei den sogenannten Koalisierfiltern handelt sich um eine fasrige Matrix (z. B. aus Polymeren oder Glasfasern), die kontinuierlich mit der Emulsion beschickt wird und an der die Öltröpfchen aufprallen bzw. adsorbieren, zu Kreuzungspunkten wandern und koaleszieren. Sind die gebildeten Tropfen groß genug, werden sie mit der Strömung von dem Kreuzungspunkt weggerissen und können an anderen Fasern erneut anhaften, woraufhin sich der Vorgang wiederholt. Die Haftkräfte an den Fasern dürfen somit weder zu klein noch zu groß sein [Wines et Brown, 1997].

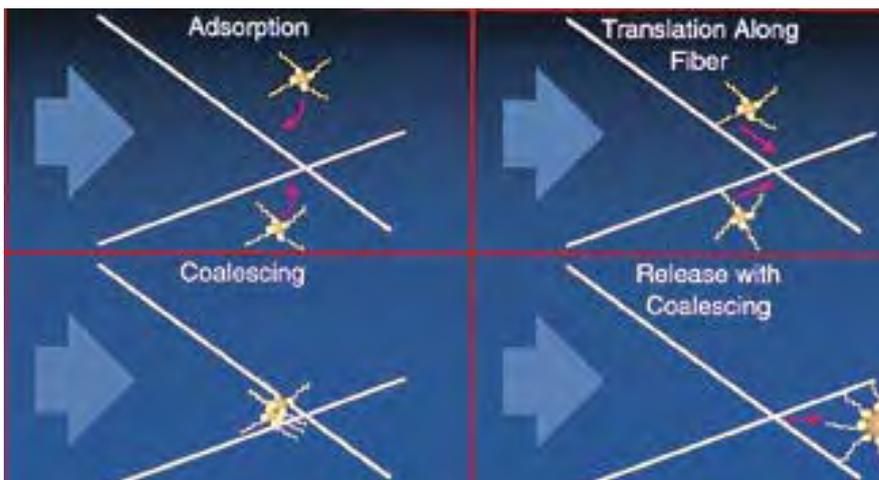


Abbildung 19: Wirkungsweise eines Koalisierfilters [Wines et Brown, 1997]

Tenside wirken sich unter Umständen stark negativ auf die Adsorption und somit auf die Koaleszenz aus, zumindest bei Wasser-in-Öl-Emulsionen. Die Tenside adsorbieren nämlich an den Fasern und können dadurch die Fasern von den Tropfen abschirmen und somit den Koaleszenzprozess stark beeinträchtigen. Dies wird im Englischen „Disarming“ der Koaleszenzabscheider genannt. Darum spielen die Oberflächen-Eigenschaften und die Wahl der Fasern eine entscheidende Rolle [Wines et Brown, 1997]. Ebenso sind Tenside bei Öl-in-Wasser-Emulsionen nicht ideal und verschlechtern die Abscheide-Leistung. Der Einfluss der Tenside auf verschiedene Fasern sollte wiederum getestet werden.

Durch die feine Porenstruktur erreicht man eine gute, viel bessere Trennung als bei Plattenkoaleszern. Effektiv betrieben wird der Filter bis zu Tropfendurchmessern von 25 [µm] [Boam, 2003]. Die Firma Mahle Industriefiltration behauptet hingegen, Tropfen mit Durchmesser bis zu 1 µm einwandfrei abscheiden zu können [Engel et Kortmann, 2008]. Auch die Koalisierfilter

der Firma Franken Filtrertechnik befinden sich in diesem Größenbereich. Bei der Firma ACS wird die abscheidbare Öltropfengröße mit 10 [μm] für diese Art von Koaleszierfiltern angegeben [N.N., ACS liquid-liquid coaleszer design manual, 2009].

Es ist möglich, die Koalisierfilter von Mahle Industriefiltration sowohl bei emulgierenden wie auch demulgierenden Reinigern zur Ölabscheidung einzusetzen, die Fasern sind allerdings auf den jeweiligen Anwendungsfall und Reiniger einzustellen. Einfacher gelingt die Öl-Wasser-Separation aber bei nicht tensidisch stabilisierten Emulsionen (demulgierenden Reinigern). Tenside und Builder werden in der Regel nicht abgeschieden und müssen daher nicht nachdosiert werden. Dies sollte aber durch Tests geprüft werden, im schlechtesten Fall ist ein anderer Reiniger zu wählen.

Ein weiterer Vorteil der Koalisierfilter liegt in der mechanischen Zerstörung möglichen Schaums. Daher wird der Koalisierfilter von Mahle Industriefiltration als mechanischer Emulsions- und Schaumbrecher (MESB) tituliert (gemäß Auskunft von Mahle Industrie Filtration GmbH, Abteilung Technique Separation Technology, am 10.6.2009).

Nachteilig ist ein Strömungsdruckverlust, allerdings mit etwa 10 [kPa] nur ein geringer. Zudem besteht die Gefahr des Verstopfens durch Feststoffe, weswegen diese davor abgetrennt werden sollten [Frericks et al., 1997]. Mit der Zeit bilden sich auch Kanäle aus, wodurch die Abscheideleistung verschlechtert wird. Die Strömungs-Geschwindigkeit muss genau eingestellt werden um eine optimale Koaleszenz zu ermöglichen [Boam, 2003].

Koalisierfilter können auch gut zur Emulsionsspaltung mit Membranverfahren kombiniert werden. Denn des Öfteren wird eine Drossel in die Retentatleitung des Membranmoduls eingebaut, um einen höheren transmembranen Druck über die ganze Membranlänge zu gewährleisten. In einer Drossel wirken allerdings hohe Scherkräfte, die von der Membran zurückgehaltene Tröpfchen wieder zerkleinern. Chmiel schlägt deswegen in seinem Patent vor, einen bzw. mehrere Koalisierfilter anstatt einer Drossel zu verwenden, da dadurch ein Druckabfall stattfindet und gleichzeitig die Tröpfchen vergrößert werden. Versuche bestätigten die negative Wirkung der Drossel, da bei einer Kombination der beiden Verfahren eine höhere demulgierende Wirkung als durch die Addition einer Membrananlage mit Drossel und eines Koalisierfilters erreicht wurden [Chmiel, 2003]. Da Koalisierfilter nur zur Trennung von flüssig-flüssig-Dispersionen geeignet sind, muss die Temperatur oberhalb des Stockpunktes vom Öl liegen [Sokolovic et al., 2009].

9.7.19 Membrankoaleszer

Membrankoaleszer arbeiten anders als die übrigen Koaleszer. Es wird angenommen, dass der Tensidfilm an den Tröpfchen aufgrund der Reibung in den Membranporen zerstört wird. Danach kommt es entweder in den hydrophoben Poren oder danach zur Koaleszenz mit anderen „befreiten“ Öltröpfchen. Nach der Membran muss ein Absetzbecken installiert werden, damit sich die koaleszierten Tropfen absetzen können [Hlavacek, 1995].

Im Unterschied zu normalen Membranverfahren wird nicht versucht, die Trennung aufgrund des Membran-Rückhalts zu bewerkstelligen. Bei Membrankoaleszern wird das Öl nämlich durch die Poren durchgedrückt. Durch die Verformbarkeit der Tröpfchen permeieren selbst bei gewöhnlichen Rückhalte-Verfahren Öltröpfchen durch die Membran und verschmutzen das Permeat, abhängig vom Druck [Hong et al., 2003, (11), (12), (13)]. Man verwendet dazu

Mikrofiltrations-Membranen mit kleineren Poren-Durchmessern als die abzuscheidenden Tröpfchengrößen. Die angelegte Druckdifferenz muss dazu den Kapillardruck übersteigen. Da das Öl nicht von der Membran zurückgehalten wird, kommt es viel seltener zum Fouling als beispielsweise bei der UF [Hlavacek, 1995]. Einen weiteren Vorteil der Membran-Koaleszer stellt der höhere Permeat-Fluss da. Er kann den Fluss bei auf dem Rückhalteprinzip basierenden Membranverfahren um eine Größenordnung übersteigen [Hong et al., 2003].

Das abgesetzte Öl wies bei den Versuchen von Hlavacek eine um ~10-mal niedrigere Oberflächen-Spannung als normale Werte für Öl-Wasser-Gemische. Daraus lässt sich schließen, dass Tenside im abgesetzten Öl vorhanden sind.

In Cross-Flow-Versuchen zur Aufbereitung von KSS (mittlere Tröpfchengröße 1,7 [µm], enge Tröpfchenverteilung) aus der Aluminium-verarbeitenden Industrie zeigte sich, dass auch bei Membrankoaleszern die Wahl des richtigen Werkstoffes wichtig ist: Nur hydrophobe Membranen waren geeignet. Bei einer transmembranen Druckdifferenz von 30 [kPa] wurde die Ölkonzentration von ~ 3 [%] im Feed auf bis zu 30 [ppm] gesenkt. Da die Ölkonzentration im Retentat und Feed gleich war, folgerte man daraus, dass kein Öl von der Membran zurückgehalten wurde [Hlavacek, 1995].

Wichtige Einflussgrößen auf die Abscheideleistung wie Porendurchmesser oder Schergeschwindigkeit werden bei Hong et al. berichtet. Um dieses Verfahren größenmäßig besser einordnen zu können, seien hier die Versuchsergebnisse von Hong genannt. Es ergaben sich bei dem Versuch mit Teflon-Membranen verschiedener Porengröße bei einem mittleren Öltropfen-Durchmesser von 1,5 µm (Wälzöl mit nichtionischen Tensiden, Tröpfchengrößenverteilung von 0,1 bis ~10 µm) Öl-Abscheideraten von 86 [%], 81 [%], 66 [%] und 45 [%] für Porendurchmessern von 0.22, 0.45, 1.2 bzw. 5 [µm] [Hong et al., 2003].

Ist der Tropfendurchmesser kleiner als die Porendurchmesser, erhält man eine geringere Abscheiderate. Solche Bedingungen eignen sich gut für die Trennung von tensidfreien Emulsionen, bei denen selbst ein hoher Anteil von 0,1 [µm] Tröpfchen mit 5 [µm] Poren-Membranen entfernt werden kann [Boam, 2003]. Hoffmann zeigt, dass bei solchen Systemen ebenso bei Anwesenheit von Tensiden eine Abscheidung der Öle möglich ist, wenn auch im geringeren Maße und nicht bei allen Tensidarten. Bei Steigerung der Konzentration einer lipophileren nichtionische Tensidart (Brij 52; HLB < 10) von 10 auf 1000 [mg/l] fiel der Abscheidgrad von 90 [%] auf 70 [%], während er bei einer hydrophileren nichtionischen Tensidart (Brij 56; HLB > 10) schon bei 100 [mg/l] auf 30 [%] sank [Hoffmann et Nitsch, 2000].

Der Unterschied zu Koaliesierfiltern liegt vor allem in der Porengröße: Im Gegensatz zu den meisten Membrankoaleszern sind bei Koaliesierfilter die Poren größer als die Tröpfchen, sodass die Tröpfchen auf die Membran stoßen müssen, um dort dann zu adsorbieren. Es bilden sich auch keine Kanäle mit der Zeit, da das Material nicht aus beweglichen Fasern besteht.

In beiden genannten Versuchen mit Membrankoaleszer wurden definierte Tropfenverteilungen aufgearbeitet. Die Frage stellt sich, wie gut dieses Verfahren bei sehr breiten Verteilungen funktioniert, ob um den Faktor 100 größere Tropfendurchmesser noch durchgelassen werden, was aber selbst bei hohen Drücken zu bezweifeln ist. Auf jeden Fall muss die Tropfengrößenverteilung bekannt sein, um die optimale Porengröße zu wählen. Vom Funktionsprinzip scheinen

Membrankoaleszer für kleinere Öltröpfchen, allerdings auch nur für engere Öltröpfchenverteilungen als Koalisierfilter geeignet.

9.7.20 Adsorption

Eine Adsorption des Öls ist nur sinnvoll bei einem Ölgehalt in der Größenordnung von weniger als 100 mg Öl/l Lösung, scheidet also zur Reinigung normaler Abwässer aus. Als Adsorbens gibt man Betonit oder Metallsalze bei, die man später durch Filtration, Sedimentation oder Flotation aus der gereinigten Flüssigkeit abtrennt. Die Adsorption wird auch bei anderen Verfahren verwendet, wie z.B. bei der Flockulation. Wie an anderer Stelle schon erwähnt, bereitet die Entsorgung des ölhaltigen Schlammes meist Probleme [Gräf, 1998; DWA-Arbeitskreis, 2000]. Adsorption kann aber auch bei Anfallen eines nicht trennbaren Feststoff-Öl-Gemischs im Abwasser (z.B. bei kreislaufgeführten Gleitschleifanlagen) sinnvoll sein [DWA-Arbeitskreis, 2000]. Zudem können auch Tenside adsorbiert werden.

9.7.21 Erhöhung der Temperatur

Steigt die Temperatur, so steigt auch die kinetische Energie, und somit die Wahrscheinlichkeit, dass die abstoßenden Kräfte der Ladungen oder der Tensidschichten um die Öltröpfchen beim Zusammenstoßen derselben überwunden werden [Heusch, 2005]. Die Emulsionen werden zunehmend instabil. Es gelingt, insbesondere Spritzreiniger durch Erwärmung von 30 – 50 [°C] über der Arbeitstemperatur von emulgiertem Öl zu trennen. Dabei werden aber auch die Tenside abgeschieden [Jelinek et al., 1999]. Oft wird die Erwärmung zur Unterstützung eines anderen Emulsionsspalt-Verfahrens angewendet.

9.7.22 Verdampfung

Die Trennung des Öls/Fettes vom Wasser kann auch durch teilweise oder vollständige Wegnahme der wässrigen Phase mittels Destillation erfolgen. Hierbei wird das zu reinigende Gemisch über den Siedepunkt des Wassers erhitzt, es verdampft und wird an anderer Stelle wieder kondensiert. Im Sumpf reichern sich dabei schwerflüchtige Substanzen an, wie Öle/Fette, Partikel-Verschmutzungen aber auch waschaktive Substanzen wie Tenside und Builder. Im Kondensat befinden sich bei Verdampfern ohne zusätzliche Trenneinrichtungen auch leichtflüchtige und mitgerissene Substanzen. Soll es zur Spülung verwendet werden, so ist ein Schwerkraftabscheider in den Kondensatbehälter zu integrieren. Dennoch kommt es nicht an die Reinheit von VE-Wasser heran. Wird nun VE-Wasser zur Spülung verlangt, so ist von einer Rückführung ins VE-Wasser-Spülbecken abzusehen (Jelinek et al., 1999, S.147f).

Eine hohe Qualität des kondensierten Wassers kann aber durch Reinigung des Dampfes mit Zyklonabscheider und Feinfilter erreicht werden. Die Energie des Dampfes wird in der Regel entweder zum Beheizen der Bäder oder zum Erwärmen bzw. Verdampfen des zu verdampfenden Gemisches genützt. So benötigen z.B. Verdampfer mit Brüdenverdichtung keine zusätzliche Wärmeenergie.

Verschiedene Unterscheidungen von Verdampfern:

- Dünnschicht- oder Umlaufverdampfer (Zwangs- oder Naturumlauf-Verdampfer),
- Normaldruck- bzw. Vakuumverdampfer,

- ohne oder mit Brüdenverdichtung (in- oder direkte Brüdenverdichtung mittels Wärmepumpe),
- kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Betrieb

Dünnschichtverdampfer eignen sich bei stark verschmutzten oder leicht zur Verkrustung neigenden Lösungen (z.B. Lösungen mit zu hoher Salzkonzentration), das Rohr, an dem der Film herab rinnt, wird durch einen Rotor abgewischt. Bei Umlaufverdampfern unterscheidet man je nach Antrieb des Umlaufs zwischen Naturumlauf- (bedingt durch thermische Konvektion) oder Zwangsumlaufverdampfern (Umwälzung mittels Pumpe). Die Umwälzung verhindert eine Verkrustung der Wärmeübertragerflächen und bewirkt einen guten Wärmeübergang [Landl, 1993]. Man kann die Destillation auch nach dem Druck unterteilen. Der Vorteil von Vakuum- gegenüber Normaldruckverdampfern liegt wegen des niedrigeren Siedepunktes in der besseren Eignung für thermisch sensiblere sowie stark korrodierende Inhaltsstoffe, und in der geringeren Verdampfungsenthalpie [Landl, 1993, S.57]. Vakuumverdampfer verursachen allerdings einen höheren Energieverbrauch [Gräf, 1998]. Die Brüdenverdichtung steigert den Druck und die Temperatur des Dampfes und ermöglicht somit die Nutzung des Dampfes zum Verdampfen der Lösung. Der Energieverbrauch wird dabei um ein vielfaches gesenkt.

Mittels Wärmepumpe und Wasserstrahlpumpe kann ein noch geringerer Druck erzeugt werden, und somit die Siedetemperatur des Wassers weiter gesenkt werden (auf ca. 35 bis 45 [°C] bei ca. 80 [mbar]). Dadurch steigt zwar der Energieverbrauch, aber man hat keine Probleme mit korrodierenden oder schäumenden Medien [Planasch, 2003, S.158].

Allgemein müssen folgende Bedingungen zur Regeneration eines Reinigungsmittels mittels Verdampfung erfüllt sein:

- enger Siedebereich des Reinigers
- großer Abstand zwischen den Siedebereichen des Reinigers und der Verunreinigungen
- keine gelösten festen oder hochsiedende Reinigerbestandteile
- Inhaltsstoffe müssen Temperatur aushalten
- niedrige Siedetemperatur von Vorteil (außer bei guter Wärmerückführung)
- geringe Verdampfungsenthalpie (außer bei guter Wärmerückführung)

Beim Recyceln von Lösemittelreinigern (z. B. CKW) werden oft Verdampfungs-Anlagen eingesetzt [Verdampfung, 2009]

Zur Aufbereitung von wässrigen Reinigungsbädern sind Verdampfer schlecht geeignet, da sämtliche Reinigungskemikalien im Sumpf mit dem Verunreinigungen verloren gehen. Doch zur Regeneration von Spülbädern kann man sie durchaus einsetzen. Es stimmt, dass die Verdampfungsenthalpie von Wasser hoch ist und somit theoretisch auch der Energieverbrauch des Verdampfers (Cheryan et Rajagopalan, 1998). Doch die aufgewendete Energie kann durch Wärmetauscher gut genutzt werden, sodass in der Praxis ein nur geringer Energiebedarf besteht. Probleme kann z.B. eine durch oberflächenaktive Substanzen (Tenside) verursachte Schaumbildung bereiten [DWA-Arbeitskreis, 2000].

Verdampfer werden vor allem bei relativ kleinen Badvolumina (1000 - 3000 l) erfolgreich eingesetzt. Hält man die Überlaufmenge klein, z.B. durch Verwendung einer kombinierten Reinigungs- und Spülkaskade, und benützt man die im Dampf enthaltene Energie zur Badbeheizung, so ist dieses Verfahren wirtschaftlich zur Aufbereitung von Wasser einsetzbar [Jelinek et al., 1999, S.97].

In der Galvanik- Industrie werden bei der Galvanisierung Verdampfer neben der Spülwasseraufbereitung auch zur Rückgewinnung von in die Spülbäder verschleppten Prozesschemikalien/Wertstoffen verwendet. Bei Reinigungsprozessen ist zweiteres aber sinnlos, da der wieder eingebrachte Schmutz die Standzeit des Waschbades nur verkürzen würde, das Konzentrat muss entsorgt werden. Immerhin ist aber bei vollständiger Verdampfung ein abwasserfreier Betrieb möglich.

9.7.23 Biologische Aufbereitung

Die Reinigung des Wasch- bzw. Spülwassers von organischen Verschmutzungen kann man auch bestimmten Mikroorganismen überlassen. Sie können emulgierte Öle (auch komplexe organische Verbindungen) zu CO₂ und H₂O zersetzen. Somit wird nicht nur die Emulsion gespalten, man spart sich auch die Entsorgung des Öls. Bei optimaler Einstellung des Bioreaktors sollte überhaupt kein organischer Schlamm entstehen. Anorganische Verunreinigungen können allerdings nicht abgebaut werden.

Freie Öle werden in der Regel nicht zersetzt. Der maximale Grenzdurchmesser für Öltröpfchen beträgt 20 [µm]. Größere Tropfen werden nur von Mikroorganismen verarbeitet, die Enzyme oder Tenside abspalten können und dadurch die Aufnahme ermöglichen [Kunz, 1996].

Einsetzbar ist dieses Verfahren überall dort, wo auch eine herkömmliche wässrige Reinigung verwendet wird. Allerdings müssen die wässrigen Reinigungsmittel und die Mikroorganismen aufeinander abgestimmt werden. Die Reinigungsmittel dürfen die Mikroorganismen nicht abtöten, und die Mikroorganismen sollten, wenn möglich, die waschaktiven Substanzen nicht abbauen. Zumeist gedeihen die Mikroorganismen in neutralen Wasser (pH: 6- 8) und unter 40°C, es wurden aber auch Bakterienstämme für pH- Bereiche von 2 - 4 und > 10 sowie Temperaturen über 50 [°C] gefunden [APP, 2009]

Die Empfindlichkeit der Mikroorganismen-Populationen verlangt eine genaue Messung und Steuerung der Betriebsparameter, vor allem des pH-Werts, der Temperatur und des Nährstoffangebots [Planasch, 2003 zitiert hier Wendels S., JOT Journal für Oberflächentechnik, 11/2002]. Zumeist arbeiten sie aerob, weswegen Sauerstoff in den Bioreaktor eingetragen werden muss. Doch der höhere Anlagenaufwand wird durch den geringeren Entsorgungsaufwand kompensiert, wodurch es sich meistens nicht nur um ein ökologisches sondern auch um ein ökonomisches Verfahren handelt.

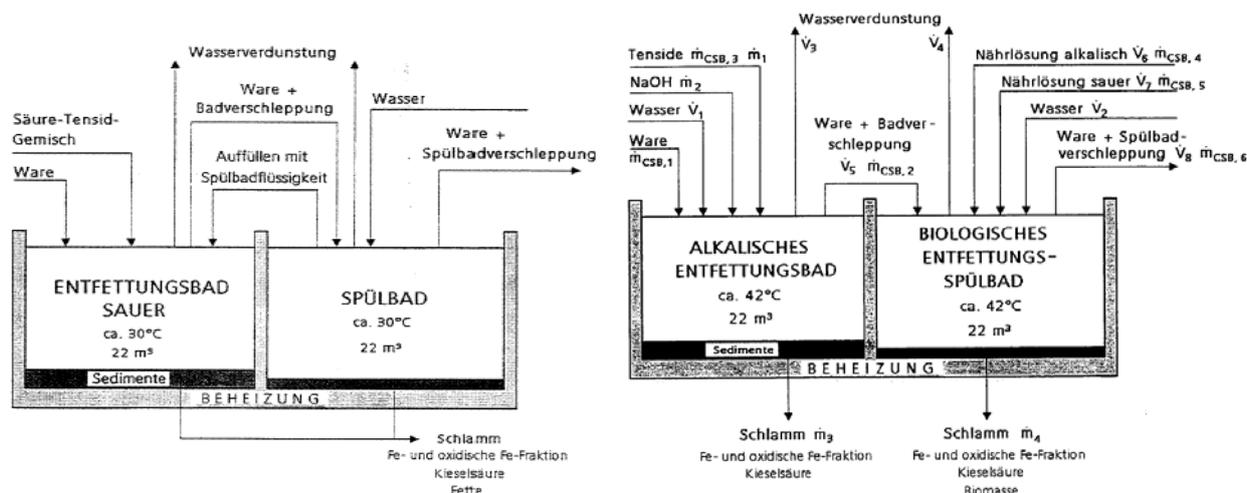


Abbildung 20: Prozessschema vor (links) und nach (rechts) der Umstellung [Kunz, 1997]

In einer Feuerverzinkerei wurde 1995 ein einfaches Spülbad in ein Bioreaktor- Spülbad umgebaut. Die Vereinigung von Spülbad und Bioreaktor ist in diesem Fall unbedenklich, da als nächster Schritt Beizen folgt, bei dem am Werkstück verbliebene Mikroorganismen abgetötet werden. Folgende Unterschiede zum oben beschriebenen Prozess ergeben sich:

Es wird nur das Spülbad und nicht das Entfettungsbad biologisch aufbereitet. Außerdem wird auf eine Membran verzichtet, da keine Flüssigkeit ins Entfettungsbad zurückgeführt wird. Zur Abscheidung von Feststoffen wird ein Nebenstrom durch einen Lamellenabscheider geschickt. Das Ergebnis lässt sich sehen: Neben besseren Reinigungsergebnissen wurde eine Amortisationszeit von 0,8 Jahren errechnet [Kunz, 1996]. Die Badstandzeit der ersten 1995 verwirklichten Anlage betrug zum Zeitpunkt 2006 bereits 11 Jahre [Planasch, 2006].

9.7.24 Druckgetriebene Membrantrennverfahren

Membranverfahren sind Filtrationsverfahren zum Abtrennen von Partikeln oder Molekülen mit einem kleineren Durchmesser als einige Mikrometer (Baker, 2004). Je nach Art und Größe der abzutrennenden Verunreinigungen unterscheidet man zwischen Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose.

	Phasen	Triebkraft	Membrantyp	Anwendung
Umkehrosmose	fl/fl	Druckdifferenz bis 200 [bar]	Asymmetrische LD-Membran	Aufbereitung wässriger Systeme; Gewinnung salzfreier Lösungsmittel
Nanofiltration	fl/fl	Druckdifferenz bis 60 [bar]	Asymmetrische LDM	Fraktionieren von gelösten Stoffen in wässrigen Lösungen
Ultrafiltration	fl/fl	Druckdifferenz bis 10 [bar]	Asymmetrische Poren- Membran	Trennung nieder- und hochmolekularer Stoffe, Konzentrierung von hochmolekularen Substanzen
Mikrofiltration	fl/fl	Druckdifferenz gewöhnlich bis 3 [bar]	Poren- Membran	Trennung fein disperser ungelöster Stoffe; Klarfiltration von Suspensionen, Konzentrieren von feinsten Feststoffen
Elektrodialyse	fl/fl	Elektrische Potential-Differenz	Symmetrische LDM mit eingebauten ionischen Gruppen	Abtrennung von Ionen aus wässriger Lösungen
Dialyse	fl/fl	Konzentrations- (Aktivitäts)-differenz	Symmetrische Poren-M. bzw. Ionentauscher- M	Säure-Recycling, künstliche Niere
Pervaporation	fl/Dampf	Partialdruck-differenz	Asymmetrische LDM	Abtrennung von Spurenstoffen aus wässriger od. organischer Lösung
Dampf-Permeation	Dampf/ Dampf	Partialdruck-differenz		Abtrennung von Spurenstoffen aus wässriger od. organischer Lösungen
Gaspermeation	g/g	Partialdruck-differenz	Asymmetrische LDM	Trennung: H ₂ /N ₂ , CO ₂ /CH ₄ , O ₂ /N ₂

Tabelle 7: Überblick über Membranverfahren [Melin et Rautenbach, 2004; Planasch, 2003]

Die Klassifizierung der Membrantrennverfahren folgt meistens nach der gerade noch durchgelassenen Partikelgröße, aber auch nach Aggregatzustand des Einsatzes und Permeats oder nach dem Trennprinzip.

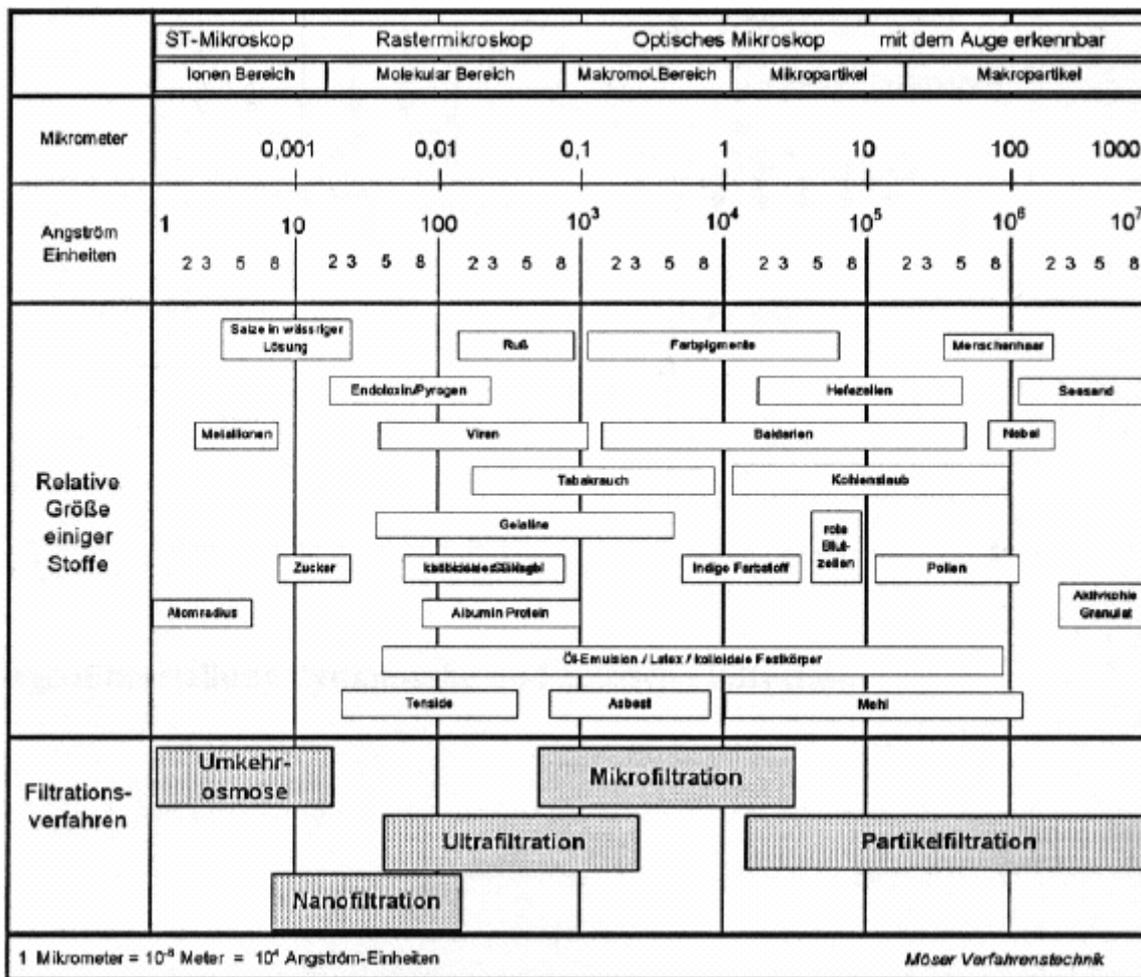


Abbildung 21: Überblick einiger Membranverfahren, Einteilung [Möser Verfahrenstechnik]

Weitere Unterscheidungsmöglichkeiten der Membranen:

- porös oder dicht (je nach Vorhandensein mikroskopisch erkennbarer Poren); dies ist vor allem für die Beschreibung des Stofftransportes durch die Membran essentiell
- asymmetrisch oder symmetrisch (je nach Aufbau der Membran)
- organisch oder anorganisch (je nach Werkstoff der Membran)
- biologische oder synthetische

Dichte Membranen werden auch Lösungs-Diffusions-Membranen (LDM) genannt. Der Stofftransport wird mit dem Lösungs-Diffusions-Modell sehr gut beschrieben. Die Trennung erfolgt aufgrund unterschiedlicher Löslichkeit und Beweglichkeit (Diffusion) der Moleküle in der Membran. Für die Diffusion in der Membran macht es hierbei keinen Unterschied, ob das Gemisch flüssig oder gasförmig vorliegt. Bei porösen Stoffen kommt das Porenmodell zur Anwendung. Der Übergangsbereich dieser Modelle liegt ca. bei 5-10 Ångström. Zu den Verfahren mit LDM zählen Umkehrosmose, Gaspermeation, Pervaporation, Elektrodialyse und Nanofiltration, wobei Baker die Nanofiltration im Übergangsbereich sieht [Baker, 2004]. Hingegen werden poröse Membranen hauptsächlich bei der Mikrofiltration, Ultrafiltration und Dialyse eingesetzt [Melin et Rautenbach,

2004]. Für die Wirtschaftlichkeit einer Membran sind vor allem die Selektivität und der Permeatfluss ausschlaggebend. Die universelle Transportgleichung lautet:

$$\text{Fluss} = \text{Triebkraft}/\text{Widerstand}$$

Membranprozesse versuchen einen unterschiedlichen Komponenten-Fluss und somit die Trennung anhand unterschiedlicher Widerstände zu realisieren (z. B. Porendurchmesser oder Diffusions-Geschwindigkeit). Die Triebkraft der Komponenten ist daher zwar für den Durchfluss wichtig, bestimmt aber nicht die Selektivität der Membran, sondern wirkt ihr in den meisten Fällen entgegen. Bei der Umkehrosmose steigert sich beispielsweise durch Rückhalt und Aufkonzentrierung des Salzes an der Membran der osmotische Druck und verringert somit die Triebkraft für den Transport des Wassers. Aus obiger Gleichung ergibt sich aber auch, dass alle unselektiven Widerstände zu verringern sind [Melin et Rautenbach, 2007].

Je nach Homogenität der Membranstruktur unterscheidet man zwischen symmetrischen (homogenen) und asymmetrischen Membranen. Wegen der Verringerung des Transportwiderstandes verwendet man heute hauptsächlich asymmetrische Membranen (z.B. eine feine selektive Membranschicht auf einer großporigen Membranstützschicht). Symmetrische Membranen kommen zur Anwendung, wenn z.B. die Membran nur zur Ausbildung einer Deckschicht dient, welche dann für die Trennung hauptverantwortlich ist [Melin et Rautenbach, 2007].

Organische Membranen bestehen aus einer oder mehreren Polymerarten, anorganische meist aus keramischen Werkstoffen oder Metallen. Auch wenn anorganische Membranen noch jünger als organische sind, haben sich keramische bereits etabliert, vor allem bei Spezialanwendungen in der Micro- und Ultrafiltration.

Vorteile anorganischer Membranen	Nachteile anorganischer Membranen
höhere Temperaturbeständigkeit (Aufgrund der Dichtung oft nicht ganz nutzbar)	spröde Eigenschaften erfordern spezielle Modulkonstruktionen
deutlich verbesserte chemische Beständigkeit (keine Membranquellung)	bei einigen Werkstoffen besteht noch immer das Problem mangelnder chemischer Beständigkeit
geringere Alterung, daher in der Regel längere Standzeiten	verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten von Keramiken und Membranmodulen führen zu Dichtungsproblemen
Rückspülung ist möglich	deutlich höhere Investitionskosten (deutlich aufwändigere Fertigung)

Tabelle 8: Vor- und Nachteile anorganischer Membranen [Melin et Rautenbach, 2004]

Flüssige Membranen (Flüssigkeiten in porösen Membranen oder emulgierte Phasen einer doppelten Emulsion), die zur Aufkonzentrierung von Schwermetallen in Wässern dienen, sollen hier der Vollständigkeit wegen nur kurz erwähnt werden.

Neben synthetischen Membranen sind auch in der Natur viele Membranen anzutreffen (z.B. Zellmembranen), deren Leistungsvermögen allerdings die der synthetischen Membranen bei weitem übertrifft.

Unter dem Membranmodul versteht man die praktische, handhabbare Einheit in der die Membran anwendungsspezifisch angeordnet ist. In der nachstehenden Tabelle sind verschiedenen Modultypen mit ihren Vor- und Nachteilen sowie Einsatzgebieten zusammengestellt. In der Regel werden dicht gepackte Module gewählt, sofern das Fouling- bzw. Verstopfungspotential gering ist.

	Schlauchmembranen			Flachmembranen		
	Rohr-Modul	Kapillar-M.	Hohlfaser-M	Platten-M.	Kissen-M.	Wickel-M.
Innendurchm.	5- 24 [mm]	0,25- 5 [mm]	40- 250 [µm]			
Packungsdichte	<80 [m ² /m ³]	<1000 [m ² /m ³]	<10000 [m ² /m ³]	50-400 [m ² /m ³]	200-400 [m ² /m ³]	1000 [m ² /m ³]
Vorteile	Turbulente Strömung	höhere Packungsdichte als Rohrmodul		einzelne Membranen auswechselbar	wenig Dichtungen	einfache, günstige Fertigung
	Unempfindlich gegen Verstopfungen	kostengünstigere Fertigung		wenig anfällig für Verschmutzung	geringe permeatseitige Druckverluste	relativ hohe Packungsdichte
	Reinigungsmöglichkeit			auch bei unklebbarer Membran	kaum anfällig für Verschmutzung	guter Stoffaustausch durch Abstandshalter (-> turbulenterer Ström.)
	geringer Druckverlust im Modul			geeignet für Elektrodialyse	im Hochdruck-Betrieb einsetzbar	
Nachteile	Geringe Packungsdichte	verblockungsanfälliger (vor allem wenn innendurchströmt)		relativ geringe Packungsdichte	relativ geringe Packungsdichte	schlechte Reinigungsmöglichkeit
	aufwendige Umlenkungen (Druckverlust)	meist laminare Strömung, wenn innendurchströmt (schlechter Stoffaustausch)		Druckverlust durch Strömungsumlenkung		z.T. langer permeatseitiger Strömungsweg
	Großer Feedstrom pro Membranfläche			viele Dichtungen	Membran muss verschweißbar oder verklebbar sein	
Einsatzgebiete	MF, UF, (RO), PV	UF, MF, GP, DL	RO, GP, DL	UF, MF, RO, PV, ED	RO, GP, NF, UF	RO, NF, (GP, PV, UF: nur bei geringem Foulingpotential/Feststoffgehalt)

Tabelle 9: Membranmodule [Melin et Rautenbach, 2004]

Je nach Anzahl der Modulanschlüsse unterscheidet man zwischen 3-End-Modulen (Einsatz-, Retentat- und Permeatstrom), 2-End (oder Dead-End, hier gibt es keinen Retentatstrom) bzw. 4-End, wobei 3-End Module die Regel sind. Bei 4-End Modulen wird mit einem Gas (Sweep) die Membran permeatseitig überströmt [Melin et Rautenbach, 2004, S.116]. Der Dead-End-Betrieb wird in der Membrantechnik meist nur vorübergehend eingestellt.

Die Wahl zwischen Dead-End-Betrieb und Cross-Flow-Betrieb (bei 3-End-Modulen) stellt sich nur bei der UF bzw. MF. Der Vorteil des Dead-End-Betriebes liegt im geringeren Energieverbrauch. Bei hohem Feststoffgehalt benötigt man aber wegen häufigeren Rückspülen der Membran mehr Energie, zudem geht beim Rückspülen jedes Mal Permeat verloren. In diesem Fall wird dann der Cross-Flow-Betrieb günstiger. Die Deckschichtbildung wird beim Cross-Flow-Betrieb mittels Wandschubspannung kontrolliert. Diese kann durch Steigerung der Geschwindigkeit oder durch Reduzierung des hydraulischen, Feed-seitigen Durchmessers erhöht werden. Auch rotierende Einbauten bzw. rotierende Membranen kommen zu diesem Zweck zum Einsatz. In der biologischen Abwasserreinigung werden auch manchmal getauchte Membranen verwendet, da diese weniger Energie bedürfen als die Cross-Flow-Membranen, und durch die in das Becken eingebrachte Luft/Sauerstoffblasen zumindest zum Teil gereinigt werden. Allerdings benötigt man wegen der geringen Druckdifferenz (permeatseitiger Unterdruck) eine große Membranfläche [Melin et Rautenbach, 2004].

9.8 Kontinuierliche Überwachung der Reinigungsbäder und -leistung

Für eine wirtschaftliche und prozesssichere Reinigung von Werkstücken in der Automobilindustrie liefert die Überwachung der Reinigungsbäder einen entscheidenden Beitrag. Durch die Bestimmung der Badbelastung und der noch vorhandenen Reinigerkonzentration kann der optimale Zeitpunkt für den Badwechsel ermittelt werden. Ein Wechsel des Reinigungsbades ist dann vorzunehmen, wenn das Reinigungsbad beim Reinigungsvorgang keine Reinigungsleistung mehr erzielt. Für die Kontrolle der Reinigungsleistung stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung. Die indirekte Messung der Reinigungsleistung beinhaltet die Ermittlung der aktiven Konzentration der Reinigerprodukte sowie die Bestimmung der Verunreinigung des Reinigungsbades.

9.8.1 Überwachung der Reinigerkonzentration

Für die Überwachung der Builder- und Tensidkonzentration stehen folgende analytische Untersuchungsmethoden zur Verfügung:

- Volumetrische Alkalitätsbestimmung
- Photometrische Bestimmung von relevanten Builderkomponenten (Phosphat, Carbonat)
- Photometrische Tensidbestimmung
- Tensiometrische Tensidbestimmung (Blasendrucktensiometrie)
- Bestimmung der Leitfähigkeit

Die volumetrische Alkalitätsbestimmung ermöglicht die Ermittlung der Builderkonzentration durch eine einfache Titrationsmessung. Die Nachteile der Methode sind, dass Inhaltsstoffe, die die Alkalität des Reinigungsbades beeinflussen, miterfasst und die Tensidkomponente nicht bestimmt werden. Hydroxide, Amine, etc. von Kühlschmierstoffen und Korrosionsschutzmitteln verfälschen in weiterer Folge das Messergebnis.

Die photometrische Builderbestimmung dient zur Ermittlung der Konzentration einer relevanten Builderkomponente wie beispielsweise der Phosphationen. Das Messergebnis wird durch andere Inhaltsstoffe des Reinigungsbades nicht beeinflusst und ermöglicht die Berechnung der tatsächlichen Builderkonzentration. Eine Abnahme der Builderkonzentration wird hauptsächlich durch Verschleppung verursacht und bei Verwendung eines 2-Komponentensystems ist dann eine Nachdosierung des Builders erforderlich.

Die photometrische Tensidbestimmung wird durch vorgefertigte Tests in Glasküvetten stark vereinfacht. Mit den Testkits können die Gehalte von nichtionischen, kationischen und anionischen Tensiden bestimmt werden. Anhand des Messwertes kann der Verbrauch der Tensidkomponente berechnet und bei Verwendung eines 2-Komponentensystems die Tensidkomponente getrennt nachdosiert werden.

Die volumetrische und photometrische Builder- und Tensidanalytik sind einfache und praktikable Untersuchungsmethoden, die jedoch für eine Online-Messung nicht geeignet sind.

Die Bestimmungsmethodik der Blasendrucktensiometrie kann diskontinuierlich und zur Online-Messung verwendet werden. Es werden Gasblasen, an denen sich die grenzflächenaktiven Tenside anlagern können, mit einer genau definierten Blasenbildungsrate in dem zu untersuchenden Reinigungsbad erzeugt. Der maximale Blasendifferenzdruck der erzeugten Blase wird gemessen und die dynamische Oberflächenspannung als Maß für den Tensidgehalt ermittelt. Im Betriebslabor der Fa. Magna Powertrain wird die dynamische Oberflächenspannung als Messgröße für die diskontinuierliche Überwachung der einzelnen Reinigungsbäder der Teilewaschanlagen herangezogen.

Die Aufbereitungsverfahren, die als Maßnahmen für die Badpflege eingesetzt werden, entfernen nicht nur Ölanteile, sondern auch Teile der Tensidkomponenten des Reinigungsbades. Die Menge der zurückgehaltenen Tenside hängt unter anderem von der Trennleistung des Aufbereitungsverfahrens, dem Öleintrag sowie der Stärke des demulgierenden Reinigersystems ab. Eine kontinuierliche Messung des Tensidgehaltes ermöglicht nach Anpassung an den spezifischen Prozess eine genaue Nachdosierung der verbrauchten Tensidkomponente. Mit der Online-Messung des Tensidgehaltes wird eine Über- und Unterdosierung vermieden, indem die erforderliche Tensidmenge kontinuierlich auf die Badbelastung eingestellt wird.

Die Bestimmung der Leitfähigkeit kann diskontinuierlich als auch zur Online-Messung für die Ermittlung des Gesamtsalzgehaltes des Reinigungsbades verwendet werden und dient als Richtwert für den Buildergehalt. Der Tensidgehalt wird nicht erfasst. Der Messwert wird von der eingeschleppten Salzfracht aus den Verunreinigungen verfälscht.

9.8.2 Überwachung der Badqualität

Für die Ermittlung der Badqualität können Messmethoden herangezogen werden, die die Inhaltsstoffe der Badverunreinigungen ermitteln. Fette, Öle, und Wachse stellen den überwiegenden Anteil der Badbelastung dar, die mit den Werkstücken in das Reinigungsbad eingetragen werden und in Wasser mit den vorhandenen oberflächenaktiven Substanzen O/W Emulsionen bilden. Die Zunahme der Badbelastung und die Änderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften der O/W Emulsionen lassen sich mit folgenden einfachen Messmethoden ermitteln:

- Bestimmung des CSB - Gehaltes / TOC – Gehaltes
- Bestimmung des Partikelgehaltes
- Bestimmung der Trübung

Die diskontinuierliche Bestimmung des CSB-Gehaltes erfasst sämtliche organische Inhaltsstoffe des Bades, die chemisch oxidierbar sind. Zu den oxidierbaren Substanzen gehören Fette, Öle und Wachse, die die Hauptverunreinigung des Reinigungsbades darstellen. Die auf diese Weise ermittelte CSB-Konzentration wird als chemischer Sauerstoffbedarf bezeichnet und die Messung erfolgt mit vorgefertigten Testküvetten nach einem thermischen Aufschluss photometrisch. Die CSB-Bestimmung der Reinigungsbäder ermöglicht die Festlegung und Einhaltung eines Ölgrenzwertes. Anhand der CSB-Werte kann die Effizienz von Badpflegemaßnahmen wie beispielsweise die von Koaleszenzölabscheider ermittelt und überwacht werden. Ein zu hoher Ölgehalt in dem Reinigungsbad reduziert den Anteil an aktivem Reiniger, der dispergiert oder emulgiert in das nachfolgende Bad verschleppt wird und zu einer erhöhten Zunahme der Badbelastung führt.

Zu den modernen Sensorsystemen für Reinigungsbäder gehören die Online-Partikelzähler, die durch einen Laserlicht-Sensor Partikelanzahl und -größe bestimmen. Diese Online-Überwachung gestattet nicht nur die Bestimmung des Schmutzgehaltes in dem Reinigungs- und Spülbad und die Kontrolle von voreingestellten Grenzwerten, sondern auch die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der Öltröpfchen. Eine Änderung der Partikelgrößenverteilung der Öltröpfchen führt zu einem abweichenden Stabilitätszustand des Bades und resultiert in ein Entfettungsbad mit zunehmenden emulgierenden oder demulgierenden Eigenschaften. Die Überwachung der Partikelgröße ermöglicht somit die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Koaleszenzölabscheider. Bei einer zu geringen Partikelgröße der Ölparkeln, verursacht durch einen niedrigen aktiven Tensidgehalt oder einer hohen Ölkonzentration, wird eine Koaleszenz der Öltröpfchen und anschließende Ölabtrennung erschwert.

Bei gleich bleibender Partikelgrößenverteilung der Öltröpfchen kann die Bestimmung der Trübung als Richtwert für die Schadstoffbelastung von Reinigungsbädern herangezogen werden. Diese diskontinuierliche Methode ist kostengünstig und sehr einfach anzuwenden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zur prozesssicheren und wirtschaftlichen Reinigung in der Regel die Überwachung der Builder- und Tensidkonzentrationen sowie des

Ölgehaltes ausreichend ist. Auf Basis dieser ermittelten Kontrollparameter kann der erforderliche Badwechsel angezeigt und eine optimale Badstandzeit für die Reinigungsbäder erzielt werden.

9.8.3 Überwachung der Oberflächen- / Produktreinheit

Die qualitativen Anforderungen an den Reinigungsprozess und der dadurch erzielbaren Oberflächenreinheit wird in aller Regel durch den nachfolgenden Fertigungsschritt bestimmt. Grundsätzlich stehen analytische Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Oberflächenreinheit zur Verfügung, der effiziente Einsatz erfordert allerdings die Kenntnis der tolerierbaren Verschmutzung im darauffolgenden Prozessschritt. Da diese Kenntnis vielfach nicht vorhanden ist wird in der Praxis meist die erfolgreiche Durchführung des nachfolgenden Prozessschrittes geprüft.

Um in weiterer Folge den Prozessablauf unter Berücksichtigung der geforderten Qualitätsanforderungen kontinuierlich überwachen zu können, ist neben der Überwachung der Badqualität auch eine Überwachung der Produktreinheit anzustreben. Für die Beurteilung der Oberflächenreinheit gibt es eine Reihe von direkten Messverfahren (z.B. Testtinten), die eine rasche und kostengünstige Beurteilung der Oberflächenreinheit erlauben. Da diese Verfahren für eine zeit- und prozessanalytische Erfassung der Oberflächenreinheit aber nur bedingt einsetzbar sind, geht die Entwicklung stark in Richtung optischer Methoden (z.B. Fluoreszenzspektroskopie) mit dem Vorteil der berührungslosen Analyse. Dadurch kann die Qualität der Reinigungsprozesse bereits während des Fertigungsprozesses am Bauteil geprüft werden wodurch eine sichere und rasche Qualitätskontrolle erzielt werden kann. Nachstehend sind auszugeweise zwei Methoden der Oberflächenanalyse und Sauberkeitsmessung näher dargestellt:

- Bestimmung der Oberflächenreinheit mittels Testtinten (direkte Messung)
- Bestimmung der Oberflächenreinheit mittels Fluoreszenzspektroskopie (optische Messung)

Die Bestimmung der Oberflächenreinheit mittels Testtinten ermöglicht eine rasche und kostengünstige Beurteilung der Produktreinheit nach erfolgtem Reinigungsprozess. Bei den Testtinten handelt es sich um Flüssigkeiten mit definierter Oberflächenspannung, die auf die Oberflächen des zu prüfenden Werkstoffes aufgestrichen werden. Die Testtinten sind mit fast jeder beliebigen Oberflächenspannung in einem Bereich von 18,4 mN/m bis 105 mN/m erhältlich. Die Auswertung erfolgt durch Beurteilung der Benetzbarkeit der Oberflächen mit den einzelnen Testflüssigkeiten. Die Angabe der Oberflächenenergie in mN/m erfolgt in dem Bereich, in dem zwei untersuchte Testtinten die Oberfläche zwei Sekunden vollständig sowie teilweise benetzen. Ist die Oberflächenenergie des Feststoffes höher als die Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Flüssigkeit, so wird der Tropfendurchmesser durch eine gute Benetzung der Flüssigkeit auf der Oberfläche des Werkstücks möglichst groß werden. Bei einem Kontaktwinkel von über 90° zieht sich die Tinte zusammen, unter 90° bleibt die Tinte haften [Tigres, 2005].

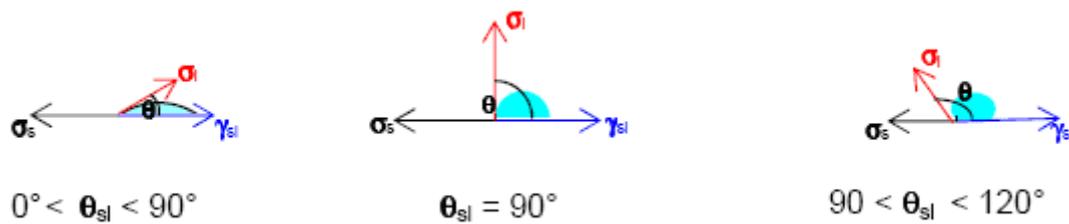


Abbildung 22: Unterschiedliche Benetzung eines Tropfens auf der Feststoffoberfläche [Oberfläche, 2009]

Letzteres bedeutet, dass die Oberflächenenergie des Werkstücks größer gleich der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist. Ein Winkel von 0° zeigt sich im vollständigen Verlaufen und Benetzen des Films auf der Oberfläche (aber kein Abperlen), und somit die höchste Oberflächenenergie.).

Die Bestimmung der Oberflächenreinheit mittels Fluoreszenzspektroskopie beruht auf der Tatsache, dass viele Mineralölprodukte Stoffe enthalten, die bei Bestrahlung mit UV-Licht fluoreszieren oder Färbungen zeigen. Der wesentliche Vorteil dieser Methode besteht darin, dass Fluoreszenzeffekte auch bei sehr kleinen Konzentrationen deutlich sichtbar sind. Durch messen der Intensität der Fluoreszenz kann die Stärke der Schmutzschicht bzw. die Höhe des Reinheitsgrades bestimmt werden. Angeregt wird die Fluoreszenz durch Strahlung im ultravioletten Bereich, wobei Elektronen fluoreszierende Moleküle dabei Photonen absorbieren und so auf ein höheres Energieniveau gelangen.

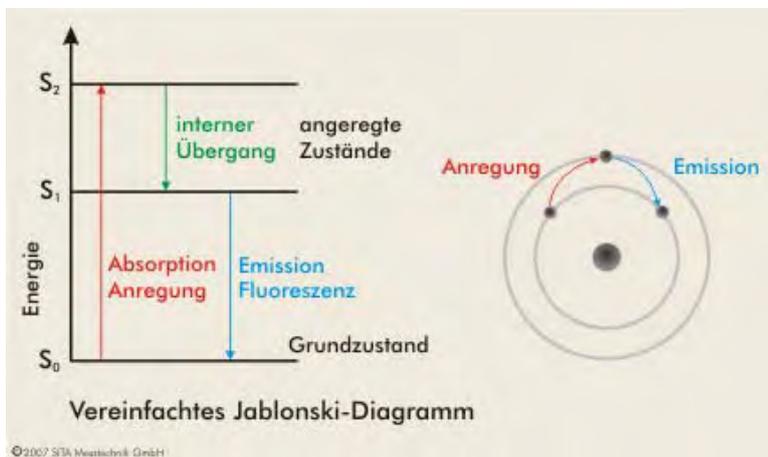


Abbildung 23: Vereinfachtes Jablonski-Diagramm [Sita, 2009]

Da dieser angeregte Zustand energetisch instabil ist, kehren die Elektronen unmittelbar unter Freisetzung von Energie und der Emission von Fluoreszenzlicht wieder in den Grundzustand zurück. Da ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird, ist die ausgesendete Strahlung energieärmer und hat damit eine größere Wellenlänge.