

Prozessoptimierung durch standzeitverlängernde Maßnahmen in schwer filtrierbaren Spülbädern

Masterarbeit im Fachbereich Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Graz

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthäus Siebenhofer
Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Technische Universität Graz

Jürgen Wögerer
Hackerweg 13
4863 Seewalchen a. A.

Mat. Nr.: 0631014

Lenzing/Graz, am 14.09.2012

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Ort & Datum

.....
Unterschrift

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
signature

Vorwort

Diese Masterarbeit mit der Thematik „Prozessoptimierung durch standzeitverlängernde Maßnahmen in schwer filtrierbaren Spülbädern“ entstand im Auftrag der *Lenzing Technik GmbH*. Die enthaltenen Untersuchungen sind Teil eines laufenden Entwicklungsprojekts der genannten Unternehmung.

Die technische Leitung des Projekts und somit auch die Betreuung dieser Arbeit seitens der *Lenzing Technik* übernahm Dipl.-Ing. Georg Eisl. Ich möchte mich an dieser Stelle für die Ermöglichung dieser Arbeit und für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthäus Siebenhofer, Begutachter und Betreuer dieser Arbeit seitens der Technischen Universität Graz gilt ebenso großer Dank.

Kurzfassung

Umweltschutzaufgaben und wirtschaftliche Aspekte, wie hohe Rohstoff- und Entsorgungskosten, zwingen Unternehmen Fertigungsprozesse effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten. So auch im Bereich der metallverarbeitenden Industrie, wo speziell bei der Nassreinigung von großen Fertigungsteilen beachtliche Mengen an Reinigungsflüssigkeit erforderlich sind.

Der Aufbereitung von Reinigungsmitteln kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Verfahren, die eine längere Nutzung und leichtere Entsorgung der Reinigungskomponenten ermöglichen, sind heute Stand der Technik. Die damit einhergehende Schonung der Ressourcen und Verringerung der Umweltbelastung regen neben dem wirtschaftlichen Standpunkt zur Intensivierung der Weiterentwicklung von Aufbereitungsanlagen an.

Ein wesentliches Verfahren zur Badaufbereitung stellt die Filtration dar. Partikuläre Verunreinigungen, die durch Abreinigung der Produkte ins Bad gelangen, können so wieder abgetrennt werden.

Im Zuge dieser Arbeit soll die Einsetzbarkeit eines automatischen Rückspülfilters der *Lenzing Technik GmbH* zur Aufbereitung wässriger Reinigungsbäder ermöglicht werden. Dazu wurden in Vorversuchen verschiedene Filtermaterialien und unterschiedliche Rückspülvarianten bezüglich ihrem Standzeitverhalten analysiert. Die Ergebnisse dieser Langzeitversuche zeigten, dass aufgrund der besseren Regenerierung, Quadratmaschengewebe für diese Filterbauart zu bevorzugen sind. Die untersuchten Rückspülvarianten brachten nur bedingt Verbesserungen.

Die aufgezeigten Maßnahmen zur Standzeitverlängerung wurden teilweise im Erstbetrieb des Pilotfilters in der Badaufbereitung umgesetzt. Mit dem gewählten PVDF-Quadratmaschengewebe und angepasster Parametrierung des Filters wurde bereits eine 24-tägige Standzeit ohne Verblockung erreicht.

Abstract

Statutory environmental constraints and economic aspects, such as high raw material cost and disposal cost, encourage industry to construct and operate more efficient and environmentally friendly plants. Regarding cleaning systems in the metal working industry huge quantities of detergents are required. Separation of particulate matter from rinsing liquors would be a significant cost saving factor.

Therefore the recycling of cleaning baths is becoming increasingly important. Recycling processes which allow an extended use of cleaners and an easier disposal of waste are state of the art. The conservation of resources, the decrease of environmental pollution and the economic benefit encourage further developments of recycling plants.

An essential method for cleaning bath treatment is filtration. It enables removal of particulate impurities, which load the bath liquor in the cleaning process.

The aim of this master thesis is to implement an automatic backpurge filter, developed by *Lenzing Technik GmbH*, in aqueous cleaning systems. For this purpose investigations were done by using different filter media and several backpurge types. The results showed advantageous properties of square mesh filter cloth because of better cleaning properties. The investigated backpurging mode showed limited improvement.

The results were validated in pilot plant scale. 24 days operation without blocking was achieved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
2	Stand der Technik	4
2.1	Reinigungsmittel.....	4
2.2	Aufbereitungstechnik wässriger Reinigungsbäder	5
2.3	Badanalytik wässriger Reinigungssysteme.....	7
3	Grundlagen	8
3.1	Fest/Flüssig-Trennung	8
3.2	Filtration und Modellvorstellungen	9
3.3	Einflussgrößen auf die Filtration	11
3.4	Filtergleichung – mathematische Beschreibung	12
3.5	Filterbauart – Rückspülfilter	14
3.6	Filtermittel	14
3.6.1	Loch- und Schlitzbleche	15
3.6.2	Textil- und Metallgewebe	15
3.6.3	Filtermittelmodifikationen	17
3.7	Haftung von Partikeln	17
3.7.1	Haftkräfte in flüssiger Umgebung.....	17
3.7.2	Einflussgrößen der Haftkraft in flüssiger Umgebung	19
3.8	Reinigungs- und Spülbadtechnologie	20
3.8.1	Flüssige Reinigungssysteme	20
3.8.2	Wässrige Reiniger	21
3.8.3	Reinigungsanlagen – Arten und Parameter	22
3.8.4	Badaufbereitung	23
4	Experimenteller Teil	25
4.1	Vorgehensweise – Versuchsablauf	25

4.2	Auswahl der Filtermittel	26
4.3	Filtermittelwiderstandsmessungen	29
4.3.1	Versuchsaufbau – Drucknutsche	29
4.3.2	Versuchsdurchführung	30
4.3.3	Auswertung und Versuchsergebnisse	31
4.4	Standzeitversuche Filtermaterial und Fahrweisen	34
4.4.1	Funktionsprinzip – Automatischer Rückspülfilter <i>OptiFil</i>	34
4.4.2	Versuchsaufbau – Pilotanlage und Einbindung	35
4.4.3	Analytik	40
4.4.4	Versuchsdurchführung	40
4.4.5	Auswertung der Versuchsdaten	42
4.4.6	Ergebnisse und Vergleich	44
4.4.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	53
4.5	Umsetzung der Standzeitversuche auf den Spülbadprozess	56
4.5.1	Prozessaufbau und Daten	56
4.5.2	Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse	58
4.5.3	Ausblick	59
5	Zusammenfassung	60
6	Verzeichnisse	63
6.1	Abbildungsverzeichnis	63
6.2	Tabellenverzeichnis	64
6.3	Literaturverzeichnis	65
7	Anhang	67

Formelzeichen

A	Filterfläche [mm ²]
B	Durchlässigkeit [m ²]
H(t)	Kuchenhöhe [mm]
ΔP	Druckdifferenz [Pa],[bar]
P	Druck [Pa],[bar]
s	Filtermitteldicke [mm]
t	Zeit [s]
V	Volumenstrom [m ³ /h]

α	spezifischer Filterkuchenwiderstand [m ⁻²]
β	Filtermittelwiderstandskoeffizient [m ⁻¹]
κ	konstantes Verhältnis Kuchen- zu Filtratvolumen [-]
η	dynamische Viskosität [Pa*s]

Indizes

1	Feedseitig
2	Filtratseitig
3	Rejektseitig
F	Filtrat
Fix	gleich bleibender Wert
FM	Filtermittel
H	Kuchenhöhe
K	Kuchen

1 Einleitung

Die Erzeugung eines Produktes erfordert im Regelfall mehrere aufeinander folgende Fertigungsprozesse, welche mit dem Einsatz von Hilfs- und Betriebsmitteln verbunden sind. Die Ressource Wasser nimmt bei den Herstellungsverfahren einen großen Stellenwert als Betriebsmittel ein. Verwendung findet es beispielsweise als prozessbedingtes Kühlmittel, als Basismittel zur Dampferzeugung oder (in Kombination mit Additiven) als Prozesslösung, wobei vor allem letzteres durch den technischen Gebrauch an die Bildung von Abwasserfrachten geknüpft ist. So auch in den metallverarbeitenden Industrien, wo speziell bei der chemischen und elektrolytischen Behandlung von Metalloberflächen größere Abwassermengen erzeugt werden. Exemplarisch sei elektrolytisches Entgraten, elektrochemisches Polieren, chemisches Vernickeln und das Phosphatieren von Metallen genannt. An den Fertigungsprozess sind notwendige Vor- und Nachbehandlungsstufen, wie Spül- und Reinigungsschritte, gekoppelt, die ebenfalls zur Entstehung von Abwässern beitragen.

Die zunehmende Verknappung an Wasser, der energetische Aufwand zur Erzeugung von Prozesswasser und die steigenden Entsorgungskosten für Abwässer führen dazu, dass Spül- und Reinigungsprozesse neben der Steigerung ihrer Reinigungsleistung auch in Hinsicht auf ihre Umweltverträglichkeit nachhaltiger gestaltet werden. Man erstrebt durch die Auswahl von geeigneten Reinigungsmitteln toxische Substanzen zu vermeiden und mit effektiver Prozessgestaltung die Abwasserfrachten zu minimieren. Ziel ist es, die Standzeit von Reinigungslösungen zu verlängern, um den Bedarf an Wasser und Chemikalien zu senken.

Die Aufbereitung der Spül- und Reinigungsbäder zur Standzeitverlängerung und Reduktion der Betriebskosten erlangt somit zunehmend an Bedeutung. Durch den Gebrauch enthalten die Badlösungen Feststoffe, Fette und Ölreste, die es abzutrennen gilt. Dazu steht heutzutage eine Vielzahl von Aufbereitungsverfahren zur Verfügung, die je nach Art der Verschmutzung ausgewählt werden. Generell können die eingetragenen Feststoffe erfolgreich durch mehrstufige Filtrationsverfahren unterschiedlicher Trennschärfe aus der Lösung entfernt werden. Zur Abtrennung der partikulären und gelösten hochmolekularen Verschmutzungsfraucht sind Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen im Einsatz. Die Abstimmung der Aufbereitungsschritte aufeinander und vor allem auf das Reinigungssystem ist ein wesentlicher Faktor für die Langlebigkeit eines Reinigungsbades.

1.1 Aufgabenstellung

Die Filtration ist ein wirkungsvolles Verfahren zur Aufbereitung von Reinigungsbädern. Einsatz findet es zur Abtrennung von Verunreinigungen und zum Schutz andere Anlagenkomponenten. Die *Lenzing Technik GmbH* arbeitet an einem Entwicklungsprojekt, welches die Anwendung eines automatischen Rückspülfilters zur Filtration von Reinigungsbädern ermöglichen soll. Bereits durchgeführte Pilotierungsversuche zeigen, dass aufgrund der Komplexität der Badzusammensetzung der Filter nach wenigen Tagen zuwächst und so den wirtschaftlichen Betrieb verhindert.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Aufbereitung wässriger Reinigungsbäder der Automobilindustrie durch den Einsatz des automatischen Rückspülfilters *OptiFil* der *Lenzing Technik GmbH* untersucht und ermöglicht werden. Dazu sollen Modifikationen am Filtersystem aufgezeigt werden, die eine Verlängerung der Standzeit bewirken und somit die wirtschaftliche Filtration des Bades gewährleisten.

Hierfür wird im Kapitel 2 auf den momentanen Stand der Technik bezüglich angewandter Reinigungssysteme und deren Anlagentechnik zur Aufbereitung eingegangen.

Im Anschluss sind im Kapitel 3 die erforderlichen Grundlagen für die durchgeführten Untersuchungen enthalten. Es wird ein Einblick in die Filtration und deren Einordnung in das Themengebiet der Fest/Flüssig-Trennung gegeben. Nachfolgend sind Kenntnisse über die Bauart Rückspülfilter und der dafür einsetzbaren Filtermittel dokumentiert. Grundlagen der Haftung von Partikeln und Details zur Reinigungs- und Spülbad-technologie bilden den Abschluss dieses Kapitels.

Der Experimentelle Teil dieser Arbeit, Kapitel 4, beschäftigt sich mit der Optimierung des *Lenzing OptiFil* Filtersystems und ist in drei Teilbereiche unterteilt.

Den ersten Abschnitt bilden die Abwicklung des Projektes, die Auswahl der zu untersuchenden Filtermaterialien und die Ermittlung der Widerstandsdaten der gewählten Filtermittel im Labormaßstab.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit Standzeituntersuchungen von Filtermaterialien. Diese Pilotierungsversuche im wässrigen Medium stellen den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Einerseits werden die Eigenschaften der Filtermittel selbst, andererseits die

Betriebsweisen unterschiedlicher Rückspülvarianten untersucht, verglichen und dokumentiert.

Der dritte Abschnitt beinhaltet die Umsetzung der Ergebnisse aus den Pilotierungsversuchen auf das Filtrationsverfahren im Bäderprozess der Automobilindustrie. Neben dem Aufbau des Reinigungsprozesses sind die Einbindung des installierten Testfilters gleicher Bauart und bereits erzielte Betriebsdaten enthalten. Den Abschluss bildet ein Ausblick für weitergehende Optimierungen.

2 Stand der Technik

Verunreinigungen, die durch Bearbeitungsschritte an Metalloberflächen anhaften, müssen durch Reinigungsverfahren abgetrennt werden, um so die qualitativen Voraussetzungen für nachfolgende Fertigungsprozesse gewährleisten zu können. Moderne Verfahren bedienen sich an mehrstufigen Reinigungsanlagen mit dem Fokus auf hinreichende Partikelabtrennung, einer maximalen Standzeit der Reinigungsbäder und einem minimalen Chemikalienverbrauch. Die Sicherstellung dieser Bedingungen wird durch die Anpassung der Reinigungslösung sowie der Anlagentechnik an die zu reinigenden Bauteile und deren Verschmutzung bewerkstelligt. Eine geeignete Prozessführung und der Einsatz von Aufbereitungsanlagen können die Standzeit der Bäder erhöhen und Abwasserfrachten vermindern.

2.1 Reinigungsmittel

Die Effektivität der Reinigung wird vor allem durch das eingesetzte Reinigungsmittel bestimmt. Es soll die verunreinigten Oberflächen ausreichend benetzen, Oberflächenverunreinigungen verdrängen, Öle, Fette und organische Verunreinigungen lösen und stabile aber leicht regenerierbare Emulsionen bilden.

Moderne, ökologische Reinigungsmittel sollen folgende Anforderungen erfüllen:^[1]

- cyanidfrei
- komplexbildnerfrei
- salzfrei
- regenerierbar
- gut abspülbar
- universell einsetzbar
- gut analysierbar
- gut entsorgbar

Zur Anwendung kommen Lösungsmittel, wässrige Reiniger und Salzschnmelzen, wobei letztere nur in Sonderfällen eingesetzt werden. Das Reinigen mit organischen Lösungsmitteln (CKW's, FKW's) ist heutzutage als umweltschädigend anzusehen. Sofern

auf die Anwendung von Lösungsmitteln nicht verzichtet werden kann, müssen durch Schutzmaßnahmen und Bau geschlossener Systeme die Emissionen auf ein Maß entsprechend dem Stand der Technik minimiert werden. Infolge strengerer Umweltauflagen sind neue Anlagen zunehmend auf Reinigungssysteme wässriger Basis konzipiert bzw. werden bestehende Anlage auf diese Anwendung umgerüstet. Das Vorkommen von AOX und CKW's in den Abwässern wird auf diese Weise vermieden.^[1]

2.2 Aufbereitungstechnik wässriger Reinigungsbäder

Die Behandlungsbäder reichern sich aufgrund ihres Gebrauches mit den abgereinigten Schmutzstoffen an, weshalb eine kontinuierliche Aufarbeitung für den wirtschaftlichen Betrieb unumgänglich ist. Ohne Aufbereitung wären die Bäder wegen des Verlustes der Reinigungswirkung in relativ kurzen Zeitintervallen, abhängig von der Schmutzbelastung, auszuwechseln. Die Aufbereitungstechnik gewährleistet eine längere Nutzung der eingesetzten Reiniger. Trotz der Anwendung von Aufbereitungsanlagen gehört darauf hingewiesen, dass Reinigungsprozesse Abfälle bzw. Abwasser produzieren. Die abgetrennten Abfallstoffe müssen ebenso entsorgt und die Reinigungslösung in gewissen Abständen ausgetauscht werden.

An die Fertigungsprozesse der metallverarbeitenden Industrie werden Anforderungen zur Abwassereinleitung gestellt, die auch Reinigungs- und Spülbäder betreffen. Diese Anforderungen sind:^[2]

- Eine Ausschleppung der Badinhaltsstoffe ist weitgehend zu unterbinden;
- Bereits ausgeschleppte Stoffe sind wieder zurückzuführen bzw. für eine externe Verwertung zurückzuführen;
- Eine maximale Standzeitverlängerung der Prozessbäder durch Pflegemaßnahmen gewährleisten;
- Spülwasser sind mehrmals zu nutzen;

Die Mehrfachnutzung des Spülwassers ist eine äußerste wichtige Maßnahme um hohe Abwassermengen mit geringer Beladung zu minimieren. Stand der Technik ist eine Anlagenausführung mit mindestens drei Spülstufen, beispielsweise in Kaskadenschaltung oder in gleichwertigen Schaltungsvarianten. Die Standzeitverlängerung und die Vermeidung der Verschleppung von Badinhaltsstoffen dienen vorwiegend der

Abfallreduktion, denn durch Aufbereitungsverfahren gewonnene Prozessmedien minimieren den Gebrauch von neuen Medien (Ressourcenschonung).

Prinzipiell muss bei den eingetragenen Verunreinigungen zwischen Feststoffen und Öl- bzw. Fettresten unterschieden werden, welche durch unterschiedliche Verfahren wieder aus der Lösung abzutrennen sind. Eine wirksame Abscheidung dieser Inhaltsstoffe kann die Badstandzeiten erheblich verlängern.

In wässrigen Systemen werden als erster Aufbereitungsschritt feste Verunreinigungen aus der Lösung entfernt. In der Regel sind Filtrationsverfahren, apparatetechnisch in verschiedensten Ausführungsformen, aber auch Sedimentationseinrichtungen (Schwerstoffabscheider, Durchlaufbehälter, Lamellenabscheider), Magnetabscheider für eisenhaltige Partikel und Hydrozyklone im Einsatz. In großen Anlagen ist die Feststoffabtrennung meist mehrstufig ausgeführt.

Die zweite Aufbereitungsstufe bildet die Abtrennung der Öl- und Fettanteile. Organische Belastungen liegen in wässrigen Lösungen überwiegend dispers vor, wobei die Verteilung der Tropfengrößen zwischen 0,1 und 100 [μm] liegt. Nicht emulgierte Öle können durch einfache Ölabscheider, Koaleszenzabscheider oder Lamellenabscheider von der Lösung abgetrennt werden. Ölabscheider finden vor allem in demulgierenden Reinigungssystemen oder als Vorstufe zur weitergehenden Reinigung von emulgierenden Systemen Anwendung. Zur Trennung emulsionsartiger Lösungen sind Zentrifugalseparatoren und Membranfiltrationsanlagen (Mikro- bzw. Ultrafiltrationsanlagen) in Verwendung. Mikrofiltrationsanlagen entsprechen in Kombination mit Vorabscheidestufen für Feststoffe und nicht emulgierte Öle dem momentanen Stand der Technik zur Badpflege.^[1] Voraussetzung dafür ist die Abstimmung der eingesetzten Membranen auf die enthaltenen Reinigerkomponenten. Nicht verbrauchte Reinigungssubstanzen können so im System gehalten werden, wodurch eine Reduktion von MakeUp-Chemikalien mit einhergeht. Der Gebrauch von Keramikmembranen erlaubt einen Betrieb sowohl im sauren, als auch im alkalischen Bereich. Die Regeneration der Membranen erfolgt häufig mittels einer Druckstoßrückspülung, womit ein praktisch kontinuierlicher Betrieb gewährleistet ist.

Ultrafiltrationsanlagen sind vorwiegend zur Entfernung der gelösten hochmolekularen organischen Bestandteile aus nicht regenerierbaren Badlösungen im Einsatz, bevor diese der weiteren Abwasserbehandlung zugeführt werden.^{[1][3]}

2.3 Badanalytik wässriger Reinigungssysteme

Steigende Qualitätsanforderungen an die Oberflächenreinheit erfordern eine gleich bleibende Wirkungskraft der Reinigungsanlagen. Die Einhaltung der richtigen Konzentrationen von Badinhaltsstoffen ist eine Grundvoraussetzung für gut funktionierende Systeme. Durch den Eintrag von Verschmutzungen, die Verdunstung bzw. Verschleppung von Badbestandteilen und infolge der permanenten Badaufbereitung tritt eine Konzentrationsänderung auf, der durch den Einsatz von kontinuierlichen Prozesskontrollsystemen entgegengewirkt werden kann.

Zur Kontrolle der Reinigungsleistung stehen mehrere Methoden zur Auswahl, die auf der Konzentrationsbestimmung von Reinigerkomponenten (Builder und Tenside) basieren. Die Überwachung der Konzentration erfolgt durch Titrations- oder photometrische Verfahren (Alkalitätsbestimmung, Phosphatanalyse) bzw. durch Anwendung von Blasendrucktensiometrie (Tensidbestimmung) oder Leitfähigkeitsmessungen. Je nach fehlender Komponente kann diese manuell oder mit Hilfe automatischer Dosiereinrichtungen ergänzt und die Reinigungswirkung aufrecht gehalten werden.^[4]

3 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Thematik der Arbeit dokumentiert. Den Beginn bildet ein Überblick über das Themengebiet der mechanischen Fest/Flüssig-Trennung und die Einordnung der Grundoperation Filtration. Folgend sind die Grundlagen der Filtration beschrieben, beginnend bei den Modellvorstellungen der Filtration, den zugehörigen Einflussgrößen sowie die mathematische Beschreibung der kuchenbildenden Filtration. Anschließend werden Kenntnisse über die Filterbauart Rückspülfilter und die einsetzbaren Filtermittel angeführt. Details zur Partikelhaftung und der Spülbad- und Reinigungstechnologie bilden den Abschluss dieses Kapitels.

3.1 Fest/Flüssig-Trennung

Unter Fest/Flüssig-Trennung versteht man prinzipiell eine möglichst vollständige Trennung einer Suspension. Das heißt, von einer kontinuierlichen, flüssigen Phase wird eine feste, dispergierte Phase abgetrennt. Grundlegend werden thermische und mechanische Verfahren zur Trennung eingesetzt. Als thermische Verfahren seien die Destillation/Rektifikation, Extraktion, Kristallisation und die Trocknung erwähnt. Denen gegenübergestellt haben mechanische Trennverfahren den Vorteil, dass kein Phasenübergang zur Trennung notwendig ist und somit ein geringer energetischer Aufwand besteht. Je nach verfahrenstechnischen Nutzen der mechanischen Trennaufgabe spricht man von Klärung, Entwässern, Eindicken oder Auspressen.

Generell unterscheidet man im Bereich der mechanischen Fest/Flüssig-Trennung zwischen Sedimentations-, Filtrations- und Auspressverfahren. Der Trennungsprozess beruht auf verschiedenartigen physikalischen Prinzipien, welche in Tabelle 1 gelistet sind. Bei der Sedimentation erfolgt die Abtrennung der festen Phase ausschließlich durch die auf Partikel wirkende Massenkraft. Mit zunehmender Verweilzeit konzentriert sich der Feststoff lokal im Trennapparat auf, wodurch die Suspension geklärt wird. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Partikelform, Partikelgröße und die Dichte des dispergierten Stoffes sowie der Flüssigkeit.

Von Filtration spricht man, wenn eine filtrierende Schicht die Trennaufgabe übernimmt. Diese Art der Trennung ist anschließend im Abschnitt 3.2 näher beschrieben.

Das Auspressen ist eine Sonderform der Filtration. Aus einem porösen Feststoff, beispielsweise einem Filterkuchen, wird durch Einwirkung einer von außen wirkenden Kraft die Zwischenraumflüssigkeit verdrängt und dadurch verdichtet.^[5]

Tabelle 1: Fest/Flüssig-Trennverfahren – physikalische Prinzipien ^[5]

Verfahren	Wirkende Trennkraft
Sedimentation	Schwerkraft Fliehkraft magnetische Kräfte
Filtration	Schwerkraft Über-/Unterdruck Fliehkraft
Auspressen	Schwerkraft Fliehkraft Überdruck im Fluid Zwangsverformung

3.2 Filtration und Modellvorstellungen

Die Filtration ist ein mechanischer Verfahrensschritt, der die Trennung einer festen dispergierten Phase von einer fluiden Phase mit der Zuhilfenahme eines Filtermittels beschreibt. Der strömungstechnische Transport der Suspension erfolgt durch die filtrierende Schicht. Auf Grund der Porenstruktur des Filtermittels wird der enthaltene Feststoff zurückgehalten, sodass nur die geklärte Flüssigkeit (Filtrat) die Schicht durchdringt. Im Gegensatz zur Sedimentation ist kein Dichteunterschied zur Phasentrennung erforderlich. Als treibendes Potential dient neben der Schwer- oder Zentrifugalkraft vorwiegend eine Druckdifferenz, die technisch durch Überdruck oder Unterdruck erzeugt werden kann. Je nach Größe der abzutrennenden Teilchen unterscheidet man die Arbeitsbereiche der Fein-, Mikro-, Ultra- und Nanofiltration sowie der Umkehrosmose. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Einsatzbereiche und enthält Beispiele für die Größenordnung des Trennprozesses. Prinzipiell gilt, dass mit Reduktion der Teilchengröße der Kräfteaufwand zur Trennung steigt.

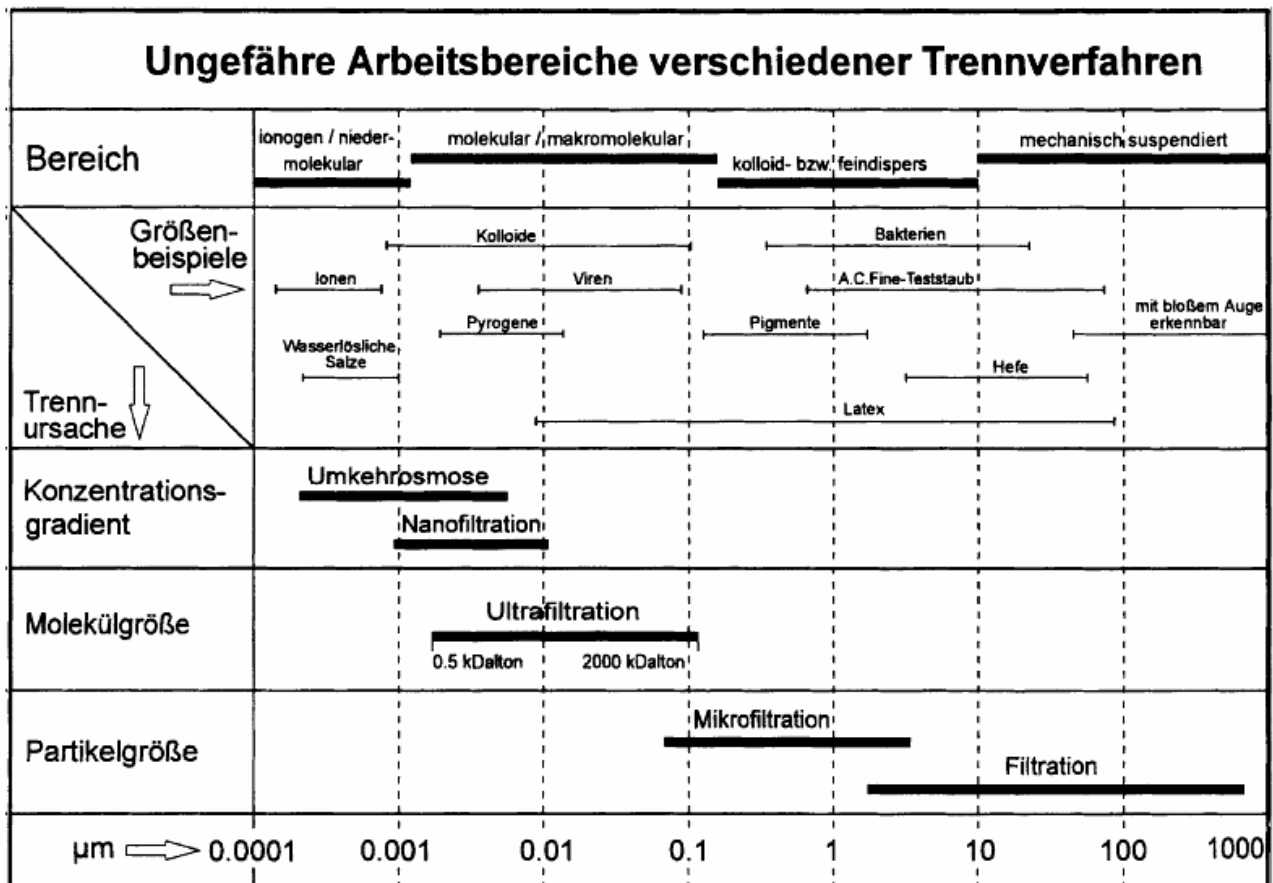


Abbildung 1: Arbeitsbereiche der Filtration in Abhängigkeit der Partikelgröße [6]

Um die Vorgänge bei der Filtration beschreiben zu können, bedient man sich an differierenden Modellen, welche unterschiedliche Abscheidemechanismen als Grundlage haben. Hierzu sind die Teilgebiete Oberflächenfiltration und Tiefenfiltration zu unterscheiden.

Bei der Oberflächenfiltration werden die Feststoffpartikel aufgrund ihrer Größe an der Oberfläche einer Sperrschicht (Filtermittel, Filtertuch, Kuchenoberfläche) abgeschieden. Diese Filterschicht sollte für das Fluid möglichst durchlässig und für den Feststoff unpermeabel sein.

Der zurückgehaltene Feststoff verringert die offene Fläche des Filtermittels und erhöht den Durchströmungswiderstand. Wenn durch die abgetrennten Partikel ein unzulässig hoher Druckverlust entsteht, ist ein zusätzlicher Schichtaufbau am Filtertuch unerwünscht. Man spricht von Sieb- oder Verstopfungsfiltration. Bei dieser Filtrationsart bestimmt die Porengröße des Filtermediums das Grenzkorn der Trennung.

Verweilt der abgeschiedene Feststoff auf der Filtermittelfläche, übernimmt dieser die filtrierende Wirkung, wodurch auch Partikel, die kleiner als die Öffnungen des

Filtermediums sind, abgeschieden werden. Voraussetzung ist ein gut durchströmbarer Kuchen mit moderatem Druckverlust. Dieser Vorgang ist als Kuchenfiltration bekannt und stellt die am häufigsten angewandte Filtrationsart dar.

Neben der senkrecht zur Filterfläche geführten Suspensionsströmung (Dead-End Filtration) kann der Suspensionsfluss auch parallel zur Filterfläche erfolgen (Querstromfiltration, Cross-Flow Filtration). Querströmungen werden in der Membrantechnik angewandt um sehr kleine Teilchen ($< 1 \text{ } [\mu\text{m}]$) abzutrennen.

Tiefenfilter scheiden den Feststoff nicht an der Oberfläche des Filtermediums ab, sondern im Inneren der Filterschicht. Die Trennung beruht einerseits auf dem Sperreffekt andererseits und überwiegend auf den Bindemechanismen zwischen Partikel und Filtermedium. Die Partikel werden durch Diffusions- und Sedimentationsvorgänge zur Filteroberfläche transportiert und durch Van-der-Waals- und elektrostatische Kräfte daran gebunden.

3.3 Einflussgrößen auf die Filtration

Projektierungen von Filtrationssystemen ohne Vorversuche und gegebenenfalls Pilotierungen sind aufgrund von zahlreichen Einflussfaktoren, die auf den Filtrationsprozess einwirken und selbst in Wechselwirkung zueinander stehen, nur in den seltensten Fällen möglich. Die Einflussfaktoren reichen von Betriebsbedingungen über die Eigenschaften des Filtermediums bis zu den Eigenschaften der beteiligten Prozessmedien. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Filtrationsabläufe permanent durch Betriebsschwankungen Veränderungen aufweisen.

Die Einflussfaktoren sind zum Überblick aufgelistet:^{[6][7]}

Betriebsbedingungen

- Anströmung
- Druck(differenz)
- Filtrationsgeschwindigkeit
- Filterfläche
- Temperatur

Filtermedium

- Porengeometrie
- Porengrößenverteilung

- Porenoberfläche
- Porosität
- Tiefe des Filtermediums
- Werkstoff
- Chemische Beständigkeit
- Mechanische Stabilität
- Thermische Stabilität

Grenzflächenwirkungen zwischen Filtermedium/Suspension bzw. Partikel

- Elektrokinetische Wechselwirkung (Zeta-Potential)
- Oberflächenspannungen der Zulaufmedien

Partikelbeschaffenheit

- Form
- Partikelgrößenverteilung
- Verformbarkeit

Suspensionseigenschaften

- Feststoffgehalt
- Flüssigkeitsart
- Viskosität

3.4 Filtergleichung – mathematische Beschreibung

Bei kuchenbildenden Filtrationsvorgängen kann der Zusammenhang zwischen Filtratvolumenstrom, Druckdifferenz, Filterfläche und spezifische Durchströmungseigenschaft mit der Filtergleichung beschrieben werden. Voraussetzungen für die Gültigkeit dieser mathematischen Beschreibung sind:^[5]

- Die Konzentration der zu filtrierende Suspension ist zeitlich und örtlich konstant;
- Es handelt sich um reine Oberflächenfiltration. Der Feststoff wird am Filtermittel oder an der bereits gebildeten Kuchenoberfläche abgeschieden und kann nicht ins Filtrat gelangen;
- Die Kuchenstruktur ist homogen und isomorph. Komprimierung und Sedimentation sind vernachlässigbar;
- Das Filtermittel und der Filterkuchen werden zäh durchströmt;

Der Gesamtdruckverlust bei kuchenbildenden Filtrationsprozessen besteht aus den Teilverlusten des Filtermittels und des Kuchens. Jeder einzelne Druckverlustbeitrag kann unter der Annahme von zäher Durchströmung mit der Gleichung nach D'Arcy beschrieben werden.

$$\Delta P = \Delta P_K + \Delta P_{FM} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$\Delta P = \frac{\eta \cdot H(t) \cdot dV_F}{A \cdot B_K \cdot dt} + \frac{\eta \cdot s \cdot dV_F}{A \cdot B_{FM} \cdot dt} \quad \text{Gleichung 2}$$

Der Kehrwert der Kuchendurchlässigkeit B_K wird als spezifischer Filterkuchenbeiwert α_H . Multipliziert mit der Kuchenhöhe $H(t)$ bildet dieser den Filterkuchenwiderstand. Die Größe s/B_{FM} beschreibt den Filtermittelwiderstand β .

$$\Delta P = \frac{\eta}{A} \cdot (\alpha_H \cdot H(t) + \beta) \cdot \frac{dV_F}{dt} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Kuchenhöhe beziehungsweise das Kuchenvolumen $V_K(t)$ steigt unter den getroffenen Annahmen direkt proportional mit dem Filtratdurchsatz. Somit ist das Verhältnis von Kuchen- zu Filtratvolumen konstant und die Kuchenhöhe kann geschrieben werden als:

$$\frac{V_K(t)}{V_F} = \text{const.} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$\kappa = \frac{V_K(t)}{V_F} = \frac{A \cdot H(t)}{V_F} \quad \text{Gleichung 5}$$

Eingesetzt in Gleichung 3 erhält man daraus die Filterdifferenzialgleichung.

$$\Delta P(t) = \frac{\eta}{A} \cdot \left(\frac{\alpha_H \cdot \kappa}{A} \cdot V_F + \beta \right) \frac{dV_F}{dt} \quad \text{Gleichung 6}$$

Diese Differenzialgleichung lässt sich bei unterschiedlichen Betriebsweisen von Filterapparaten analytisch lösen. Typische Betriebsweisen sind:

- $\Delta P = \text{konstant}$
- $V_F = \text{konstant}$ oder
- $\Delta P = f(V_F)$

Letzteres ist beispielsweise bei Anlagen mit Kreiselpumpen der Fall.

3.5 Filterbauart – Rückspülfilter

Generell können Bauarten von Filterapparaten einerseits nach ihrem verfahrenstechnischen Prinzip (Vakuum-, Druck-, Schwerkraftfilter, Zentrifugen oder Pressen), andererseits nach ihrer Betriebsweise (diskontinuierlich, kontinuierlich) eingeteilt werden.

Es handelt sich um (automatische) Rückspülfilter, wenn die Filterfläche einer zyklischen Abreinigung unterliegt, die im Wesentlichen die Funktion des Filters bestimmt. Rückspülungen werden angewandt, um die gebildete Deckschicht oder den aufgebauten Kuchen vom Filtermittel abzulösen und so den Durchsatz an Filtrat wieder zu erhöhen. Wichtig ist, dass während der Filtration die gewünschte Trenngrenze vom Filtermittel erzielt werden kann.

Entscheidende Parameter bei Rückspülungen sind:^[8]

- das Filtrationsintervall zwischen zwei Rückspülungen
- die Dauer der Rückspülung
- die bei der Rückspülung wirkende Druckdifferenz

Bei der Rückspülung selbst kommt es kurzzeitig zur Strömungsumkehr, das heißt, bereits erzeugtes Filtrat wird als Rückspülmedium verwendet. Man spricht hierbei von Rückspülvorgängen mit Eigenmedium. Reicht das Filtrat zur effektiven Reinigung nicht aus, werden Filter mit einem separaten Rückspülanschluss versehen, wodurch zusätzlich mit Fremdmedium gespült werden kann.

Filter mit periodischen Reinigungsvorgängen werden in verschiedensten Bauformen realisiert, beginnend bei Kerzenfilter, Kantenspaltfilter bis hin zu Membranmodulen. Je nachdem ob die gesamte Filterfläche oder nur ein Teil der Fläche rückgespült wird, handelt es sich um eine diskontinuierliche bzw. kontinuierliche Betriebsweise des Filterapparates.^{[8][9]}

3.6 Filtermittel

Als Filtermittel wird eine für Fluide durchlässige Schicht bezeichnet, die bei Filtrationsaufgaben den Feststoff einer Suspension zurückhält. Die Auswahl an Filtermedien reicht von einfachen Filterpapieren/-vliesen über Textil- und Metallgeweben, Loch- und Schlitzblechen, porösen Filterelementen (Sintermetall, Keramiken) bis hin zu

Membranen und Schüttgutschichten. Bei der Wahl ist auf die mechanische, thermische und chemische Beständigkeit und auf eine ausreichende Filterfeinheit zu achten. Die Wahl des richtigen Filtermittels richtet sich in erster Linie nach dem jeweiligen Filterapparat. ^[9]

3.6.1 Loch- und Schlitzbleche

Loch- bzw. Schlitzbleche werden abhängig von der Filterfeinheit einerseits spanabhebend andererseits auf elektrolytischem Wege hergestellt. Sie zeichnen sich durch eine genau definierte Lochform und Lochgröße aus. Nachteilig ist, dass mit abnehmender Schlitz- bzw. Lochgröße auch die freie Filterfläche stark verringert wird.

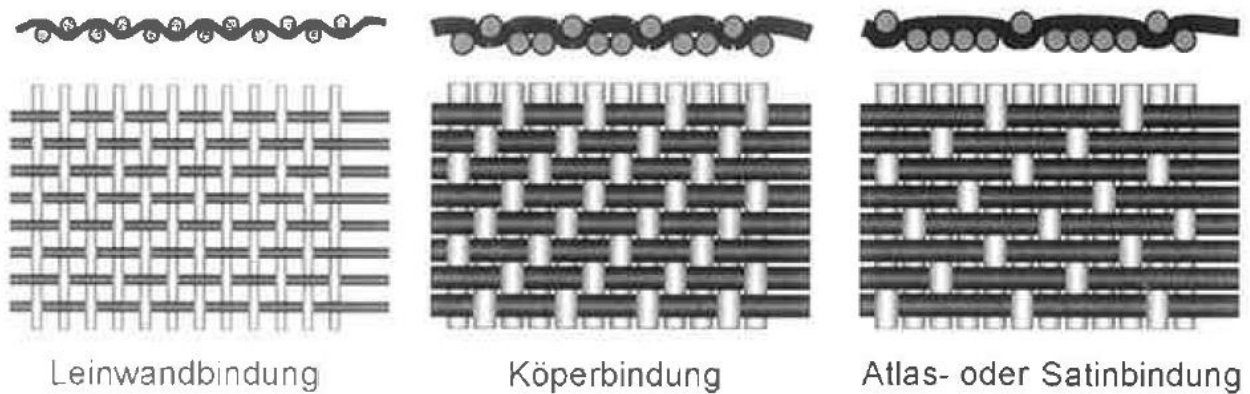
3.6.2 Textil- und Metallgewebe

Naturfasergewebe sind heutzutage großteils von Kunstfasergeweben verdrängt worden. Diese sind je nach Anforderung bezüglich chemischer Beständigkeit überwiegend aus Kunststoffen, wie Polyamid (PA6, PA6.6), Polyester (PE) oder Polypropylen (PP) hergestellt. Werden besonders aggressive Medien filtriert oder findet die Filtration bei hohen Temperaturen statt, kommen auch andere Werkstoffe, wie beispielsweise Fluorcarbongewebe, zum Einsatz. ^[7]

Neben den synthetischen Werkstoffen finden Gewebe aus unterschiedlichen Metalllegierungen Anwendung. Diese zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Formstabilität aus. Die Festigkeit von Metall erlaubt die Herstellung von Geweben, die aufgrund der geringen Fadendicken höhere Filterfeinheiten und höhere Durchlässigkeiten als Kunststoffgewebe bieten. Abgesehen vom Material sind die Fadenart (Mono- oder Multifilamente), Fadendicke, Bindungsart und der konstruktive Aufbau Einflussgrößen, die die Charakteristik eines Gewebes definieren.

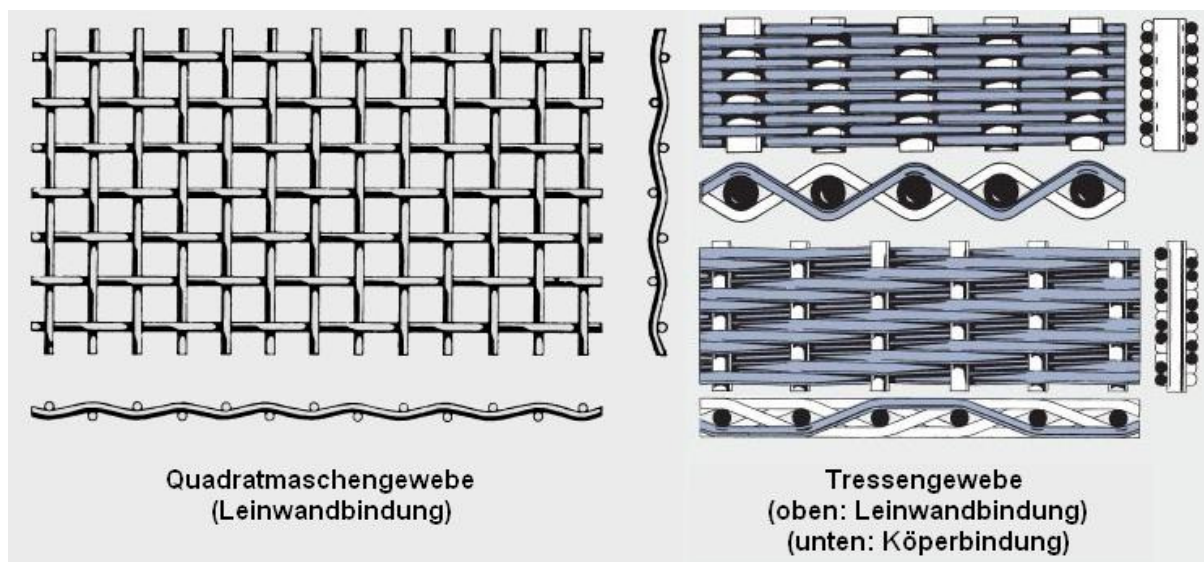
3.6.2.1 Bindungstypen und Gewebearten

Filtergewebe bestehen immer aus zwei Fadensystemen, den Kettfäden und den Schussfäden. Bei der Herstellung werden die Schussfäden quer zu den Kettfäden eingewoben. Je nach Umschlingungsart zwischen den Fadentypen entstehen verschiedene Bindungsvarianten. Die in der Filtration meist eingesetzten Bindungstypen sind die Leinwand-, Köper- und Satinbindung. Abbildung 2 zeigt diese Bindungsarten.

Abbildung 2: Bindungsarten Filtergewebe ^[7]

Bei den Gewebearten unterscheidet man prinzipiell zwischen Quadratmaschengeweben und Tressengewebe. Quadratmaschen zeichnen sich dadurch aus, dass die Schussfäden in einem gewissen Abstand zueinander eingewoben werden. Es entstehen Filtermittel, die quer zur Anströmung einen offenen Bereich aufweisen. Der Abstand zwischen den einzelnen Fäden wird als Maschenweite bezeichnet und gibt die Filterfeinheit an.

Werden die Schussfäden eng aneinander liegend verwoben, entstehen so genannte Nullmaschengewebe (Filtertressen). Diese können sehr vielseitig aufgebaut sein. Neben den differierenden Bindungsarten werden auch unterschiedliche Fadenstärken verwoben.

Abbildung 3: Gewebearten Filtergewebe ^[10]

Prinzipiell sind bei der Herstellung kaum Grenzen gesetzt. Angefangen bei der Verarbeitung von verschiedenartigen Fadenformen und -dicken in den unterschiedlichen Bindungsvarianten, reicht die Produktion bis zur Erzeugung von Verbundgeweben und mehrschichtigen Filtermitteln.

3.6.3 Filtermittelmodifikationen

Um Filtermaterialien noch anwendungsspezifischer gestalten zu können, benutzt man Nachbehandlungsverfahren (Veredelungsverfahren). Entwicklungen gehen zunehmend in die Oberflächenbehandlung und Beschichtung von Geweben, um elektrostatische Eigenschaften oder Benetzungs- und Adsorptionseigenschaften zu verändern.^[11] Zwei bei Kunststoffgeweben bereits häufig angewandte Verfahren sind die thermische Behandlungen zum Fixieren der Bindungen und das Kalandrieren, wodurch Porenöffnungen verkleinert und glatte Oberflächen erzeugt werden.

Die Veredelungsverfahren sollen die Lebensdauer, das Rückhaltevermögen, den Kuchenabwurf (bei Kuchenbildung) und den Filtratfluss positiv beeinflussen.

3.7 Haftung von Partikeln

Haftkräfte sind in vielen verfahrenstechnischen Anwendungen von Bedeutung. Allgemein wird in Haftung zwischen Partikeln und Haftung zwischen Partikel und Wand unterschieden. Als Wand bezeichnet man Festkörperoberflächen, die im Verhältnis zu den Partikeln wesentlich größer sind. Je nach Verfahren können Haftkräfte erwünscht oder unerwünscht sein. Flockungsprozesse oder die Tiefenfiltration sind typische Anwendungen, die auf dem Prinzip der Haftung beruhen. Als problematisch stellt sich die Haftung dar, wenn sich Partikel beispielsweise an Apparatebauteilen oder Werkzeugen anlagern und somit die Funktion beeinträchtigen. Bei Reinigungsvorgängen müssen die wirkenden Haftkräfte durch hydrodynamische Trennkräfte überwunden werden.

3.7.1 Haftkräfte in flüssiger Umgebung

Die möglichen Haftmechanismen zwischen Partikel sind nach Schubert^[12] in Abbildung 4 dargestellt. Es werden Bindungen mit stofflicher Kraftübertragung (Festkörper- und Flüssigkeitsbrücken) und Bindungen durch immaterielle Kraftübertragung (Anziehungskräfte) unterschieden. Bei fadenartigen oder flachen Teilchenformen sind auch formschlüssige Bindungen möglich. Durch die Ausbildung von Festkörper- oder Flüssigkeitsbrücken können im Vergleich zu den Anziehungskräften relativ große Kräfte übertragen werden.^[13]

Abgesehen von möglichen formschlüssigen Verbindungen wirken in flüssiger Umgebung nur Van-der-Waals Kräfte und elektrostatische Kräfte, die kapillaren Kräfte entfallen. Als

Van-der-Waals Kraft bezeichnet man zwischenmolekulare Anziehungskräfte, die aufgrund von Dipol-Wechselwirkungen zwischen den Atomen und Molekülen entstehen.

Zu elektrostatischen Wechselwirkungen kommt es zwischen geladenen Teilchen oder zwischen geladenen Oberflächen und Teilchen. Je nach Ladung tritt eine Abstoßung oder Anziehung der Kontaktpartner auf. Oberflächenladungen entstehen z.B. durch einen Phasenübergang von Ionen oder durch spezifische Adsorption der Ionen an der Grenzfläche.

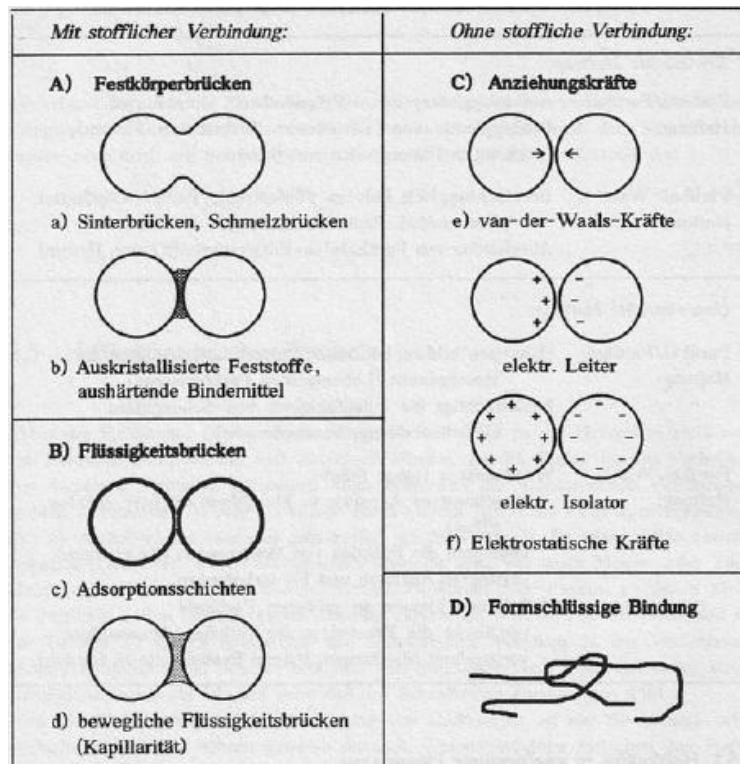


Abbildung 4: Haftmechanismen zwischen Feststoffpartikeln nach Schubert^{[12][13]}

Die effektiv auf gleichsinnig geladene, suspendierte Teilchen wirkende Kraft ergibt sich demnach durch die Überlagerung der anziehend wirkenden Van-der-Waals- und der abstoßend wirkenden elektrostatischen Kräfte. Deren resultierende Wirkung kann mit Hilfe der DLVO-Theorie beschrieben werden.^[7] Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen Verlauf des Wechselwirkungspotentials zwischen zwei Partikeln, abhängig von deren Abstand. Es ist erkenntlich, dass bei größerem Abstand die elektrostatischen Kräfte dominieren. Wird durch fortschreitende Annäherung die Potentialschwelle (maximale Abstoßung) überwunden, kommen die Van-der-Waals Kräfte immer mehr zum Tragen und die Partikel ziehen sich an. Der Verlauf der Potentialkurve ist durch das vorhandene Grundpotential der Teilchen und dem Elektrolytgehalt der Lösung bestimmt.^[14]

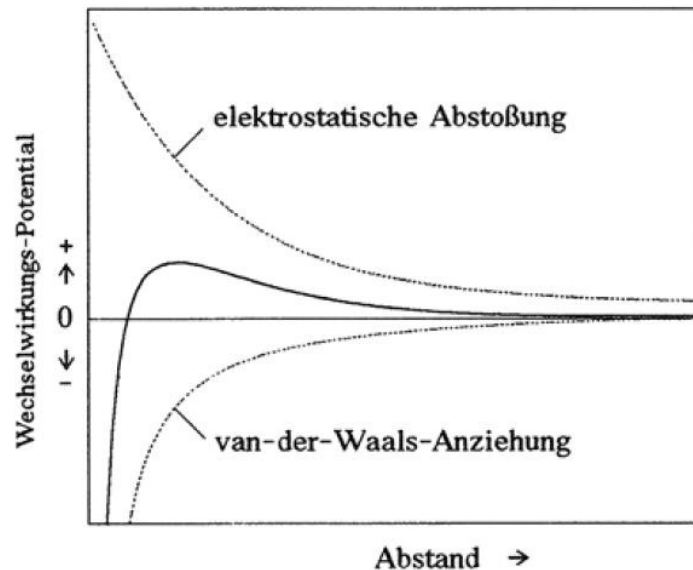


Abbildung 5: Exemplarischer Potentialverlauf von Partikelwechselwirkungen in flüssiger Umgebung^[13]

3.7.2 Einflussgrößen der Haftkraft in flüssiger Umgebung

Einen bedeutenden Einfluss auf die Haftkraft hat die Wahl des Oberflächenwerkstoffes. Einerseits hat der Werkstoff eine Einwirkung auf die Van-der-Waals Kraft. Diese Wirkung kann indirekt durch die materialabhängige Oberflächenenergie beschrieben werden. Jedes System versucht die Oberflächenenergie zu minimieren. Daraus folgt, dass Materialien mit hoher Energie dazu neigen sich mit Stoffen niedrigerer Energie zu bedecken. Ist die bedeckende Schicht ein wässriges Medium spricht man in diesem Fall von hydrophilen Eigenschaften. Gegenteilig bezeichnet man mit Wasser schwer benetzbare Flächen als hydrophob. Andererseits weist jedes Material ein anderes Oberflächenpotential auf, welches direkt in die Ausbildung von elektrostatischen Kräften einwirkt.

Theoretisch hat auch die Rauigkeit der Oberflächen einen Einfluss auf die Adhäsion der Teilchen. Im Wesentlichen spielt die Kontaktgeometrie eine entscheidende Rolle. Ausgehend vom Partikel/Wand-Modell ist das Verhältnis der Rauigkeit zur Partikelgröße ausschlaggebend. Sind die Unebenheiten kleiner als die Partikel, wirken diese als Abstandshalter zur Oberfläche, welche die Anziehungskräfte (Van-der-Waals) verringern. Bei gleicher Größenordnung kommt es zu Interaktionen mit der Rauigkeit selbst, weshalb die Anziehung wieder steigt. Nach diesem Modell von Rumpf^[15] kann es nie zu einer Vergrößerung der Haftkräfte kommen. Realistisch ist jedoch, dass durch die Rauigkeiten Partikel an mehrere Stellen gleichzeitig haften können und sich somit die Kraft verstärkt. Für elektrostatische Kräfte gelten im Prinzip die gleichen Modellvorstellungen wie für die Van-der-Waals Kräfte.

Stellt ein Reinigungsmedium die flüssige Umgebung dar, können die Eigenschaften des Reinigers die Haftkraft der Partikel beeinflussen. Grundlegend kann durch eine Veränderung des pH-Wertes, eine Temperaturänderung oder die Zugabe von grenzflächenaktiven Substanzen, so genannten Tensiden, die Adhäsion beeinflusst werden.

Der Vollständigkeit sei erwähnt, dass durch Deformation der Partikel, entweder durch äußere Kräfte oder die Haftkraft selbst, es zu deutlichen Änderungen der Haftung kommen kann.^[16]

3.8 Reinigungs- und Spülbadtechnologie

Reinigungs- und Spülbäder werden häufig in metallverarbeiteten Industrien benötigt, weshalb in diesem Kapitel ausschließlich auf die Reinigung von Metalloberflächen eingegangen wird.

Eine Grundvoraussetzung für Nachbehandlungsverfahren von Metallen, wie beispielsweise Beschichtungs- oder Lackierprozesse, ist immer eine möglichst reine Oberfläche des Bauteils. Deshalb ist vor einem Oberflächenbehandlungsverfahren eine Reinigungs- und Entfettungsstufe unumgänglich. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Verschmutzungsarten werden an industrielle Reinigungsanlagen großen Anforderungen gestellt. Neben partikulären Verschmutzungen wie Schweißperlen, Metallabrieb und Zunder haften an den Oberflächen auch vom Fertigungsprozess stammende Öl- und Fettreste, die entfernt werden müssen. All diese Verunreinigungen beeinflussen in negativer Form einen Nachbehandlungsprozess und vermindern die Qualität des erzeugten Produktes.

3.8.1 Flüssige Reinigungssysteme

Zur Reinigung der Oberflächen werden wässrige oder lösungsmittelhaltige Reinigungssysteme angewandt. Die Auswahl des Reinigungsmittels richtet sich in erster Linie nach dem Werkstoff des Bauteils und der Art der Verunreinigungen, aber auch nach den Folgeprozessen und der Anlagenausführung.^[17]

Organische Lösungsmittel wie (halogenierte) Kohlenwasserstoffe (CKW, KW) wurden wegen der guten Löslichkeit von Fetten und Ölen in vielen Anwendungen eingesetzt. Die Vorteile der Lösungsmittel sind unter anderem die universelle Einsetzbarkeit, ein schnelles Trocknen der gereinigten Teile und die Verwendung von einfachen aber geschlossenen

Anlagen. Nachteilig erweist sich die Toxizität und der zur Regeneration benötigte hohe Energiebedarf. Außerdem können Salze und feste Rückstände nicht ausreichend von Bauteilen abgereinigt werden. Wegen der Gesundheitsgefährdung und Umweltbelastung führt der Trend immer mehr zu wässrigen Reinigungssystemen.^[18] Im nächsten Abschnitt wird genauer auf Wasser basierende Reinigungsmittel eingegangen, da in diese Arbeit die Filtration von einem wässrigen Reiniger untersucht werden soll.

3.8.2 Wässrige Reiniger

Grundlegend bestehen wässrige Reiniger aus einem anorganischen Gerüststoff, einem so genannten Builder, und einem Netzmittel (Tenside). Zusätzlich können noch Additive wie (an-)organische Komplexbildner, Antischaummittel, Inhibitoren oder Korrosionsschutzmittel beigemischt sein.^[18]

Tenside haben die Aufgabe organische Substanzen von der Oberfläche zu lösen. Dazu lagern sie sich aufgrund ihres molekularen Aufbaus an der Phasengrenze Öl/Wasser an, verringern die Oberflächenspannung und lösen somit die organische Verschmutzung. Je nach Ladung des hydrophilen Molekülteils unterscheidet man zwischen anionischen, nichtionischen und kationischen Tensiden.

Buildersubstanzen dienen der Wasserenthärtung und Abreinigung anorganischer Verunreinigungen. Sie werden an der Metalloberfläche und dem anorganischen Schmutz adsorbiert. Die dadurch entstehende gleichsinnige Ladung des Metalls und der Verunreinigungen bewirkt eine Schwächung der Bindung zwischen den Komponenten und erleichtert somit die konvektive Abreinigung. Die Builder haben in Kombination mit den Tensiden die zusätzliche Eigenschaft die Reinigungsgeschwindigkeit zu erhöhen.^[19]

Die Einteilung der wässrigen Reiniger erfolgt nach ihren Inhaltsstoffen und den damit verbundenen pH-Werten in alkalische, neutrale und saure Reiniger. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Reinigungstypen, deren Inhaltsstoffe und Anwendungsgebiete. In dieser Arbeit sollen nur die alkalischen Reiniger beschrieben werden.

Tabelle 2: Einteilung der wässrigen Reiniger ^[18]

Klasse	pH-Wert]	Inhaltsstoffe	Anwendung	Industrie
stark alkalisch	10,5 – 13	Alkali; Silikate; Phosphate; Komplexbildner; Tenside	Stahl; starke Verschmutzungen; hoher Reinigungsanspruch	Bandstahl; Galvanik; Emailierung; Reparaturbetrieb
schwach alkalisch	8 – 10	Borate; Phosphate; Carbonate; Komplexbildner; Tenside	Leichtmetalle; Kupfer; Zink; schwache Verschmutzung; hoher Reinigungsanspruch	Galvanik; Anodisierung; Phosphatieren; Beschichten
neutral	7 – 8,5	Tenside; Lösevermittler; Phosphate; Korrosionsinhibitoren;	Empfindliche Oberflächen; schwache Verschmutzungen; Korrosionsschutz	Automobil; Werkzeug; Härten
schwach sauer	4 – 5	Saure Salze; Tenside	Stahl; alkalieempfindliche Werkstücke; Reinigen und Phosphatieren	Schienenfahrzeuge; Straßenfahrzeuge
sauer	< 1,5	Säuren; Inhibitoren	Metall; Dekapieren/ Beizen; Beizen/ Entfetten	Emailierung; Galvanik

Alkalische Reiniger zeichnen sich dadurch aus, dass sie starke und auch organische Verschmutzungen gut zu lösen. Sie werden dort eingesetzt, wo hohe Anforderungen an die Oberflächenreinheit gestellt werden. Bei stark alkalischen Systemen kann es einerseits durch die Anwendung der Alkalien (Natrium-, Kaliumhydroxid) zu Verseifungsreaktionen von Fettestern und andererseits durch die Anwesenheit von Phosphaten zur Lösung von Oberflächenoxide und Ausbildung von Phosphatschichten kommen.^[19]

3.8.3 Reinigungsanlagen – Arten und Parameter

Der wässrige Reinigungsprozess kann durch vier Parameter – Chemie, Zeit, Temperatur, Mechanik – charakterisiert werden. Diese müssen aufeinander abgestimmt sein, da jeder dieser Parameter die Reinigungseffizienz beeinflusst. Ein Einblick in die Chemie der wässrigen Systeme wurde bereits im vorherigen Kapitel gegeben. Der Faktor Zeit ist abhängig von der Menge und Art der Verunreinigungen und von der Art und Auslegung

der Anlage. Prinzipiell verbessert sich mit steigender Temperatur die Reinigungsleistung. Eine Betriebsweise mit möglichst tiefer Arbeitstemperatur ist aber energetisch zielführend. Dies kann beispielsweise durch eine mechanische Unterstützung gewährleistet werden. Die Ausführung der Anlagen richtet sich nach der Form der Bauteile, wiederum nach der Verschmutzung und der Art des Reinigers. Wässrige Reinigungssysteme werden als Spritz- oder Tauchanlagen realisiert. Optional kann die Reinigungswirkung durch Ultraschall-, Bürst- oder elektrolytische Verfahren unterstützt werden.

Spritzanlagen werden bei einfachen, großflächigen Werkstücken mit starker Verschmutzung angewandt. Die Reinigungswirkung der Chemikalien wird durch das Einwirken einer mechanischen Kraft in Form eines Druckstrahls unterstützt. Problematisch ist die Anwendung bei komplexen Metallgegenständen, die Sacklöcher oder Hohlräume aufweisen können. Mit beweglichen Düsen kann die Strahlführung dem Bauteil angepasst und der Problematik entgegengewirkt werden. Es ist zu beachten, dass das Reinigungsmittel richtig auf die Anlage abgestimmt wird, um unerwünschte Schaumbildung und eine Verstopfung der Düsen zu minimieren.

Bei Tauchanlagen wird das zu reinigende Gut in ein mit Reiniger gefülltes Bad eingetaucht. Mit dieser Ausführung können auch aufwändig gestaltete Teile behandelt werden. Wegen der ausschließlich chemischen Reinigung benötigen diese Anlagen im Verhältnis zu Spritzanlagen deutlich längere Verweilzeiten der Werkstücke. Relativbewegungen zwischen Bauteil und Flüssigkeit verbessern den Reinigungseffekt und senken die Behandlungszeit. Die Umsetzung erfolgt mit einfacher Bewegung des Bauteils im Becken, Ultraschalleinwirkung oder Badumwälzungen.

Einzelanlagen kommen in der Industrie selten zum Einsatz. Leichte, monotone Verschmutzung kann in einem einstufigen Reinigungsschritt ausreichend entfernt werden. Da meist verschiedene Arten von Verunreinigungen gleichzeitig auftreten, sind Anlagen zu mehrstufigen Reinigungs- und Spülsystemen verschalten. Der modulare Aufbau ermöglicht die Kombination von verschiedene Vorreinigungs-, Feinreinigungs- und Spülstufen. Die Ausführung und Anzahl der Stufen richtet sich nach der Anwendung.^{[17][18][20][21]}

3.8.4 Badaufbereitung

Mit zunehmender Anzahl der gereinigten Teile steigt die Schmutzbelastung des Bades, wodurch die Reinigungsleistung abnimmt. Ziel ist es, durch standzeitverlängernde

Maßnahmen die Schmutzbelastung unter einem maximal tolerierbaren Grenzwert zu halten.

Lange Standzeiten der Bäder sind aus folgenden Gründen von großer Bedeutung:^[17]

- Vermeidung von Abwasser;
- Verringerung der Entsorgungskosten;
- Verminderung des Energie- und Chemikalienverbrauchs und der entstehenden Kosten;

Zur Abtrennung von Feststoffen werden Filtrationsverfahren, Hydrozyklone, Schwerkraftabscheider und Separatoren angewandt. Mit den beiden letzteren Verfahren können zusätzlich nicht kolloiddisperse bzw. nicht emulgierte Fette und Öle abgetrennt werden. Filtrationsverfahren dienen in erster Linie zur Abscheidung von Pigmenten und Metallpartikeln. Würden diese länger im Bad verweilen, könnten sie vom Reiniger angegriffen und aufgelöst werden. Der auftretende Fremdmetallionengehalt wäre mit einem erhöhten Einsatz von komplexierenden Zusätzen verbunden.

Von zunehmender Bedeutung sind Membranverfahren als Badaufbereitungsanlagen. Diese müssen neben der Abstimmung auf den abzutrennenden Schmutz- und Öleintrag auch an das verwendete Reinigungssystem angepasst werden, da sonst Bestandteile des Reinigers (Builder und Tenside) mit abgetrennt werden. Eine vollständige Permeation der Reinigersubstanzen ist jedoch nicht möglich. Alleine wegen der Bindung der Tenside an die Ölkomponenten kann keine absolute Recyclierung des Reinigers erfolgen. Zusätzlich ist der Transport der Werkstücke immer mit einer Verschleppung der Reinigungskomponenten verbunden, weshalb moderne Anlagen mit einer permanenten Parameterüberwachung ausgestattet sind und fehlende Substanzen zudosiert werden.^{[19][21]}

4 Experimenteller Teil

In diesem Kapitel sind die einzelnen Teilschritte der Durchführung des experimentellen Teils dieser Arbeit dokumentiert. Im ersten Abschnitt wird kurz auf die Vorgehensweise bzw. Abwicklung der praktischen Arbeit eingegangen. Kapitel 4.2 beinhaltet als ersten Schritt die für Versuchszwecke erforderliche Filtermedienauswahl. Im Anschluss daran werden für die ausgewählten Filtermedien Durchströmungswiderstandskoeffizienten ermittelt. Die Vorgehensweise dazu ist im Kapitel 4.3 enthalten. Den Kernteil der experimentellen Arbeit bildet Kapitel 4.4. Dieser befasst sich mit Pilotierungsversuchen im Ablauf einer Abwasserreinigungsanlage zur Standzeitermittlung der einzelnen Filtermittel und unterschiedlichen Fahrweisen. Darin werden die Ergebnisse dargestellt sowie die einzelnen Versuche im Bezug auf unterschiedliche Eigenschaften miteinander verglichen und interpretiert. Unter anderem dienen die zuvor ermittelten Filtermittelwiderstandsdaten als Vergleichsbasis. Abschließend sind im Kapitel 4.5 die Umsetzung der Pilotierungsergebnisse auf den Spülbadprozess, bereits erzielte Ergebnisse und ein Ausblick für weiterführende Untersuchungen dokumentiert.

4.1 Vorgehensweise – Versuchsablauf

Wie in den Grundlagen erläutert wurde, hängt ein Filtrationsprozess von vielen Einflussfaktoren ab. Deshalb ist eine Anpassung der Filtration an die bestehenden Prozessbedingungen ohne Vorversuche nur schwer durchzuführen. Eine intensive Pilotierung am Standort der Reinigungsanlage war wegen des finanziellen Aufwandes nicht tragbar. Infolge dessen wurde der Entschluss gefasst, werksinterne Vorversuche bezüglich Standzeitverhalten von Filtermitteln und Betriebsweisen durchzuführen und diese Erkenntnisse auch in der Filtration von Spülbädern umzusetzen.

Um die bestehende Problematik der kurzen Filtermaterialstandzeit im Badaufbereitungs-kreislauf zu lösen, gibt es mehrere Möglichkeiten, beispielsweise chemisch in den Prozess einzugreifen oder die Anlage konstruktiv zu ändern. Aufgrund von kundenseitigen Einschränkungen konnten in chemischer Hinsicht keine Veränderungen durchgeführt werden. Der zusätzliche Eintrag von Feststoffen, zum Beispiel durch Verwendung von Filterhilfsmitteln, wurde ebenfalls abgelehnt. Somit war nur eine apparatetechnische Anpassung des Rückspülfilters an den bestehenden Prozess möglich.

Da bei Vorversuchen die Betriebsdauer des eingesetzten Apparates meist durch ein Verblocken des Filtermaterials beschränkt war, lag der erste Ansatzpunkt zur Standzeitverlängerung bei der Filtermittelauswahl. Dabei sollte hauptsächlich die Regenerierbarkeit des Filtermaterials untersucht werden. Ein zweiter Ansatzpunkt war, den Rückspülvorgang an sich zu optimieren. Da in diesem Filter das Eigenmedium (Filtrat) zur Rückspülung verwendet wird, sollte es für eine gute Abreinigung des Filtermittels möglichst rein sein. Mehrere Ansätze, dies apparatetechnisch zu bewerkstelligen, wurden überprüft.

Die beschriebenen Eingriffsmöglichkeiten zur Standzeitverlängerung wurden aus dem oben genannten Grund im Ablauf der werksinternen Kläranlage untersucht. Dieses Medium wurde gewählt, da wie in der Badaufbereitung partikuläre und faserige Feststoffe enthalten sind. Wegen der geringen Filtermittelstandzeit liegen schnell Versuchsergebnisse vor. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen bezüglich Filtermaterial und Fahrweisen soll die Betriebszeit des installierten Pilotfilters in der Badaufbereitung verlängert werden.

4.2 Auswahl der Filtermittel

Ziel bei den Filtermaterialversuchen war es, Eigenschaften aufzuzeigen, die sich positiv auf die Regenerierbarkeit und somit auf die Langlebigkeit auswirken. Die Auswahl erfolgte so, dass neben einer ausreichenden Abscheidung auch möglichst viele Eigenschaften des Gewebes untersucht und verglichen werden können.

Die Untersuchungen behandeln folgende Eigenschaften von Filtermitteln:

- Werkstoff des Filtermittels
- Filtermittelaufbau bzw. Gewebearbeit
- Oberflächenbeschaffenheit
 - elektrochemisch poliert
 - hydrophobiert/hydrophiliert

In Tabelle 3 sind alle Filtermaterialien angeführt, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Es sind neben den in dieser Dokumentation verwendeten Kurzbezeichnungen, die wichtigsten Eigenschaften der Filtermittel und der Grund für die Untersuchung angegeben. Für die Versuchsreihen der differierenden Fahrweisen (Untersuchung der Rückspülarten) wurde eine optimierte Tresse (siehe Tabelle 3 erster Zeileneintrag)

hergenommen, da diese Art von Filtermaterial bereits mehrfach in Filteranwendungen eingesetzt wurde.

Tabelle 3: Gewählte Filtermaterialien für Pilotierungsversuche in der Abwasserreinigungsanlage

Filtermittel	Bezeichnung	Filterfeinheit [µm]	Aufbau / Gewebeart	Bindungsart	Werkstoff	Oberflächenbeschaffenheit	Vergleichszweck
Optimierte Tresse	ODW	20	Tresse	Leinen	1.4404	unbehandelt	Gewebeart, Werkstoff
Breitmaschentresse	BMT	22-24	Tresse	Köper	1.4404	unbehandelt	Aufbau / Gewebeart
Hiflow Tresse	HFT	25	Tresse	Leinen	1.4404	unbehandelt	Oberflächenbeschaffenheit
Hiflow Tresse behandelt	HFTb	25	Tresse	Leinen	1.4404	elektrochemisch poliert	Oberflächenbeschaffenheit
Veconic plus	LB	20	Lochblech	-	Nickel	unbehandelt	Aufbau / Gewebeart
Filtervlies 301	V301	20	-	Nonwoven	1.4404	unbehandelt	Aufbau / Gewebeart
PRD 07-90-W-18	PRD	18	Tresse	Leinen	PET	unbehandelt	Aufbau / Gewebeart, Werkstoff
07-15/9	QM15	15	Quadratmasche	Köper	PET	unbehandelt	Oberflächenbeschaffenheit, Aufbau / Gewebeart
V07-15/9	QM15b	15	Quadratmasche	Köper	PET	hydrophobiert	Oberflächenbeschaffenheit
07-20/13	QM20	20	Quadratmasche	Köper	PET	unbehandelt	Oberflächenbeschaffenheit, Aufbau / Gewebeart
V07-20/13	QM20b	20	Quadratmasche	Köper	PET	hydrophiliert	Oberflächenbeschaffenheit
11008-175-410-60	PVDC	-	Tresse	Köper	PVDC	unbehandelt	Werkstoff
12007-090-750-130	PVDF	-	Tresse	Satin	PVDF	unbehandelt	Werkstoff

4.3 Filtermittelwiderstandsmessungen

Diese Messreihen haben den Zweck zu überprüfen, ob der Widerstand eines Filtermediums Einfluss auf dessen Standzeit hat. Dazu wurden in Laborversuchen die Widerstandskoeffizienten der einzelnen Filtermittel bestimmt. Die Ergebnisse sollen als zusätzliche Vergleichsbasis für die Auswertung der Standzeitversuche in Kapitel 4.4.6 dienen.

4.3.1 Versuchsaufbau – Drucknutsche

Die Ermittlung der Filtermittelwiderstände aller Gewebemuster wurde mit einer Labordrucknutsche durchgeführt.

Für die Versuche werden die einzelnen Filtermaterialproben mit Hilfe einer Verschraubung im Probenaufnehmer eingespannt. Der Probenhalter ist so dimensioniert, dass (abweichend von der Normempfehlung) eine Filterfläche von $1,89 \text{ [cm}^2\text{]}$ zur Verfügung steht. Ein Quadratmaschenedelstahlgewebe (Maschenweite $180 \text{ [}\mu\text{m]}$) dient zur Stützung des Filtermaterials. Kunststoffscheiben sorgen für die nötige Abdichtung und verhindern eine Querströmung in der Probe. Die Komponenten des Probenaufnehmers sind in Abbildung 6 dargestellt.

Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 ersichtlich. Der Suspensionsvorlagebehälter fasst fünf Liter und ist zum Temperieren doppelwandig ausgeführt. Ein Absperrhahn trennt den Probenaufnehmer vom Vorlagebehälter. Mit Hilfe von Druckluft und einem Druckregelventil kann der Filtrationsdruck eingestellt werden.

Unter der Nutsche sind ein Auffangbehälter und eine Waage platziert. Während des Versuches kann so die Filtratmengen Zunahme aufgezeichnet werden. Mit einem Thermometer und einem Manometer erfolgt die Überwachung der Versuchsparameter.

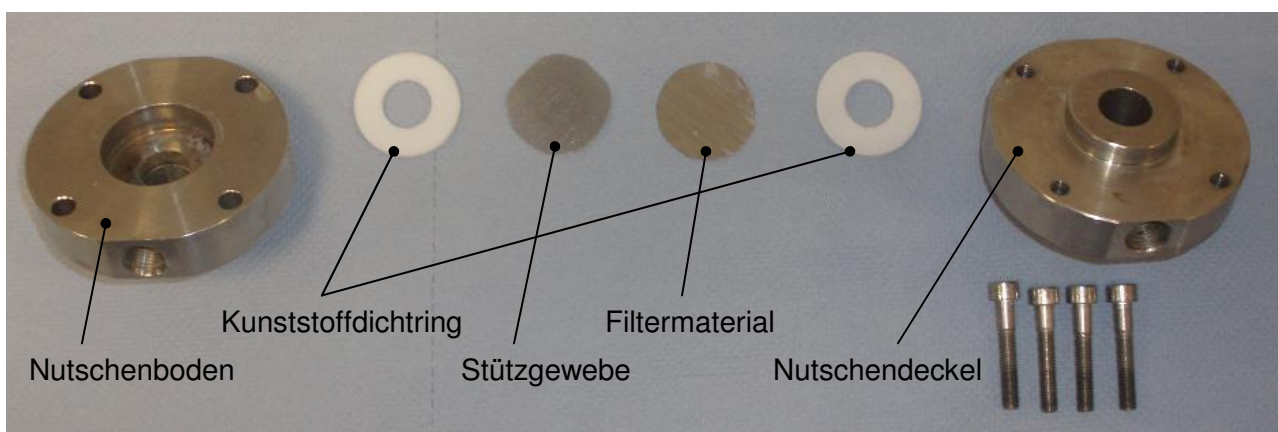


Abbildung 6: Komponenten des Drucknutschenprobenaufnehmers

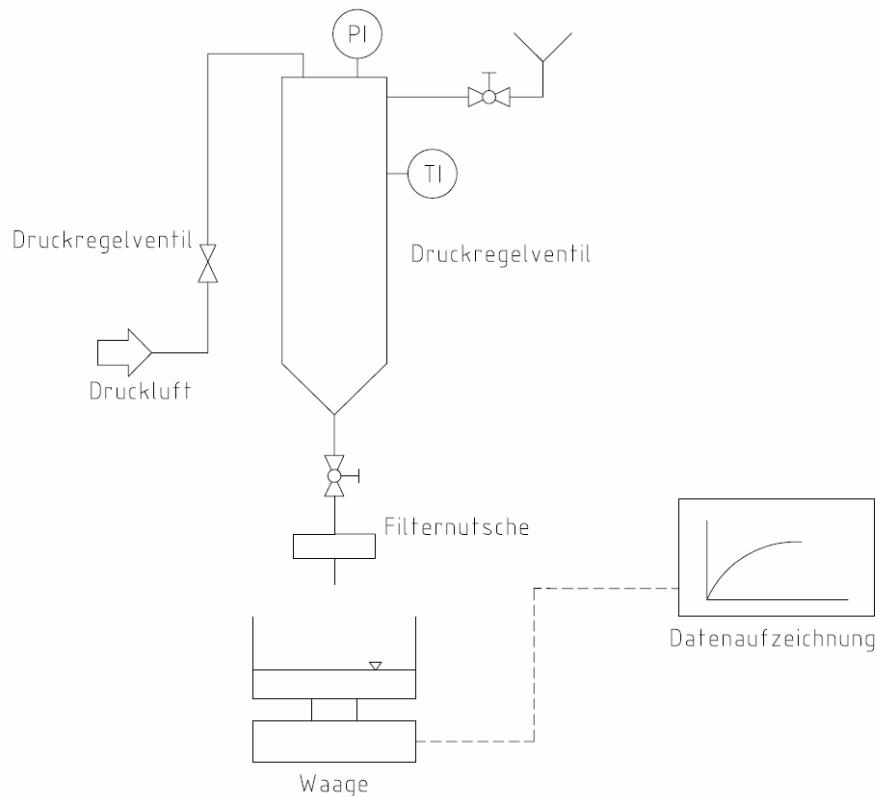


Abbildung 7: Schematischer Drucknutschenversuchsaufbau zur Messung des Filterwiderstandes

4.3.2 Versuchsdurchführung

Die Bestimmung der Filtermittelwiderstände erfolgte mit der unter Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Labordrucknutsche. Als Testmedium diente ein mit einer $0,45\ \mu\text{m}$ Filterkerze vorfiltriertes, enthärtetes Betriebswasser (EB-Wasser). Die Herstellung einer Suspension war nicht erforderlich, da nur der Tuchwiderstand und kein Filterkuchenwiderstand ermittelt werden sollte.

Zu Versuchsbeginn wird das Filtermaterial mit der Stützung in den Probenhalter gespannt und der Vorlagebehälter mit ca. $4,5\ \text{L}$ EB-Wasser gefüllt. Beim Einspannen der Probe ist darauf zu achten, dass die Gewebestruktur erhalten bleibt. Anschließend erfolgt durch kurzes Öffnen des Absperrhahnes die Benetzung der Probe. Bei geschlossenem Absperrhahn wird der Filtrationsdruck von $0,15\ \text{bar}$ eingestellt, die Datenaufzeichnung gestartet und der Absperrhahn erneut rasch geöffnet. Der Versuch gilt als beendet, nachdem das gesamte Medium das Filtermittel durchströmt hat. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt.

4.3.3 Auswertung und Versuchsergebnisse

Der Filtermittelwiderstand kann aus der Filtergleichung (Gleichung 6) errechnet werden. Für die Randbedingung, dass ein konstanter Differenzdruck während der Filtration herrscht, lautet diese:

$$\frac{dt}{dV_F} = \frac{\eta}{\Delta p \cdot A} \left(\kappa \cdot \alpha_H \cdot \frac{V_F}{A} + \beta \right) \quad \text{Gleichung 7}$$

Trägt man in einem Diagramm dt/dV_F über das Filtratvolumen V_F auf, so ergibt sich eine Gerade aus deren Steigung der spezifische Kuchenwiderstand α_H und aus deren Ordinatenabstand Δy der Filtermittelwiderstandskoeffizient β berechnet werden kann.

Unter der Annahme, dass bei Durchströmung von reinem Wasser kein Kuchen gebildet wird ($\kappa = 0$) und somit auch kein Kuchenwiderstand auftritt kann der erste Term der Gleichung vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich für den Filtermittelwiderstand:

$$\frac{dt}{dV_F} = \frac{\eta \cdot \beta}{\Delta p \cdot A} = \Delta y \quad \text{Gleichung 8}$$

Beziehungsweise

$$\beta = \frac{\Delta p \cdot A}{\eta \cdot \Delta y} \quad \text{Gleichung 9}$$

In Abbildung 8 sind beispielhaft die Messreihen eines Quadratmaschengewebes mit einer Maschenweite von 20 [μm] dargestellt. Für jeden Versuch wurde eine Ausgleichsgerade erzeugt und die Werte der Steigung und des Ordinatenabschnitt über alle Versuchsreihen gemittelt. Die gemittelte Gerade weist aufgrund des fehlenden Kuchenaufbaus nur eine sehr geringe Steigung auf.

Tabelle 4 beinhaltet in aufsteigender Reihenfolge die ermittelten Widerstandsdaten aller getesteten Filtermaterialproben. Erkennlich ist, dass die Tressengewebe in Leinwandbindung den geringsten Widerstand aufbringen. Allgemein weisen Gewebe mit dichterem Webung (dickere Kett- und Schussfäden, geringere Maschenweiten, geringere Porosität) einen höheren Widerstand auf. Weiters gut ersichtlich ist der höhere Widerstand des behandelten 15 [μm] Quadratmaschengewebes (QM15b) im Gegensatz zur unbehandelten Ausführung (QM15). Die hydrophobierte Oberfläche des QM15b erschwert die Durchströmung der Filtermittelporen. Für das Vlies (V301) konnte kein Wert ermittelt werden.

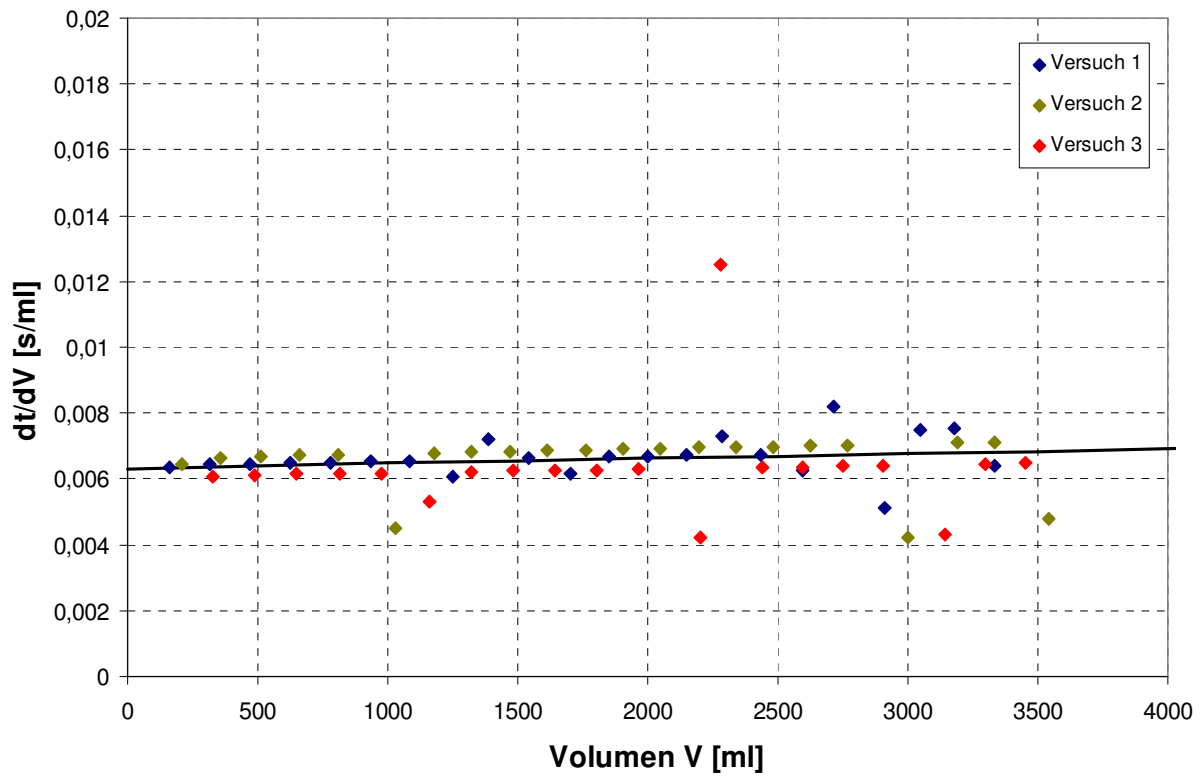


Abbildung 8: Versuchsaufzeichnung Drucknutschenversuch; Quadratmaschengewebe 20 [μm] hydrophiliert; ΔP = 0,15 [bar]; T = 22 [°C]

Tabelle 4: Ermittelte Filtermittelwiderstandskoeffizienten; treibende Druckdifferenz ΔP = 0,15 [bar]; Filterfläche A = 1,89 [cm²]

Filtermittel	Filtermittelwiderstandskoeffizient β [m ⁻¹]
HFT	1,46*10 ⁷
HFTb	1,50*10 ⁷
ODW	1,65*10 ⁷
QM20	1,72*10 ⁷
QM20b	1,94*10 ⁷
QM15	2,25*10 ⁷
BMT	2,35*10 ⁷
PRD	2,43*10 ⁷
QM15b	3,76*10 ⁷
LB	4,82*10 ⁷
PVDC	7,28*10 ⁷
PVDF	1,20*10 ⁸
V301	-

Der Aufbau und die Durchführung dieser Versuche sind an die VDI-Richtlinie 2762 Blatt 2: Bestimmung des Filterkuchenwiderstands angelehnt.^[23] Infolge der zur Verfügung stehenden Mittel, konnten einige Voraussetzungen, wie beispielsweise die Mindestfilterfläche von 20 [cm²], bei den Bestimmungen der Filtermittelwiderstände nicht eingehalten werden.

Eine Gegenüberstellung der ermittelten Daten mit Angaben aus der Literatur, siehe Tabelle 5, zeigt, dass die eingesetzten Filtermittel um mindestens eine Zehnerpotenz kleinere Widerstandswerte aufweisen (verglichen mit dem Literaturwert für Polyamidgewebe). Erklärung finden die geringeren Werte angesichts der Abweichung von der VDI-Richtlinie. Durch die kleine Filterfläche und der ausbleibenden Bildung eines Filterkuchens können die Ergebnisse in Form von höheren Permeabilitätswerten beeinflusst werden. Bei Filtermaterialien mit großer Durchsatzleistung (z.B. HFT- oder ODW-Gewebe) und wegfallendem Durchströmungswiderstand des Filterkuchens wird die Filterschicht mit diesem Aufbau zu rasch durchströmt, wodurch die Voraussetzung zur Anwendung des Ansatzes nach D'Arcy nicht eingehalten werden kann. Die Absolutwerte des Widerstandes haben für die Betrachtung in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle. Sie können trotzdem zum Vergleich untereinander herangezogen werden, da bei den Versuchen nur ein systematischer Fehler besteht.

Tabelle 5: Richtwerte von Widerstandskoeffizienten einiger Filtermittel ^[5]

Filtermittel	Filtermittelwiderstand β [m⁻¹]
Polyamid (Leinwandbindung)	$7 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9$
Filterpapiere	$7,6 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{11}$
Nadelfilze	$5 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^8$
Keramikfilter	$1,6 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9$

4.4 Standzeitversuche Filtermaterial und Fahrweisen

Die Pilotierungsversuche dienen zur Ermittlung des Standzeitverhaltens unterschiedlicher Filtermittel und zur Erprobung differierender Betriebs- bzw. Rückspülvarianten. Durch die Auswertung der Versuchsergebnisse können standzeitverlängernde Maßnahmen aufgezeigt werden.

4.4.1 Funktionsprinzip – Automatischer Rückspülfilter *OptiFil*

Das *OptiFil* Filtersystem ist ein kontinuierlich betriebenes, vollautomatisches System, das nach dem Prinzip der Oberflächenfiltration arbeitet. Die Filterfläche ist als perforiertes Rohr ausgeführt, welches an der Außenseite mit dem Filtermaterial (Filtergewebe, Filtervlies) und Stützgeweben bespannt ist. Der zu reinigende Prozessstrom (Filterzulauf) tritt axial in den Apparat ein, durchströmt das perforierte Rohr samt Filterschicht und verlässt senkrecht zur Filterfläche über ein Druckregelventil die Apparatur. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den schematischen Aufbau und das Funktionsprinzip des Rückspülfilters.

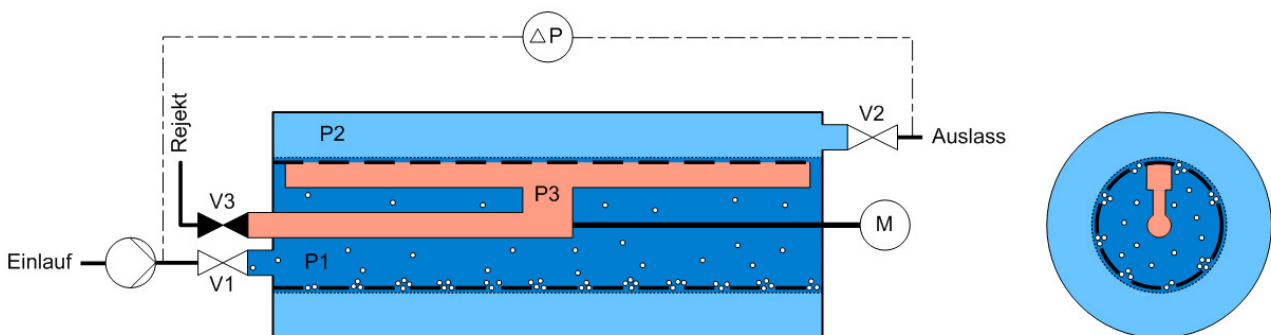


Abbildung 9: Schematischer Aufbau und Funktion des *OptiFil* Filtersystems während der Filtration

Mit zunehmender Filtrationsdauer erfolgt durch die abfiltrierten Partikel eine fortschreitende Beladung des Filtermaterials beziehungsweise ein Kuchenaufbau in den Perforationsbohrungen, wodurch der Differenzdruck ($\Delta P = P_1 - P_2$) zwischen Feed- und Filtratraum kontinuierlich ansteigt. Ist ein definierter Druckgradient erreicht, wird automatisch ein Rückspülvorgang eingeleitet. Die Auslösung einer Rückspülung ist neben einer Druckdifferenz auch zeitbezogen mittels Timer oder manuell per Taster durchführbar.

Bei einer Rückspülung durchströmt das Filtrat entgegengesetzt zur Filtrationsrichtung die Filterfläche. Dazu wird eine Rückspülvorrichtung angewandt, die als Reinigungsleiste mit

zentralem Sammelrohr ausgeführt ist. Diese Vorrichtung reinigt aufgrund des Druckunterschiedes zwischen Filtrat- und Rejektraum durch einmalige Umdrehung der Leiste die gesamte Filterfläche partiell ab. Das Rejekt kann separat abgezogen und weiter aufbereitet werden. Die Filtration stoppt während der Abreinigung nicht.

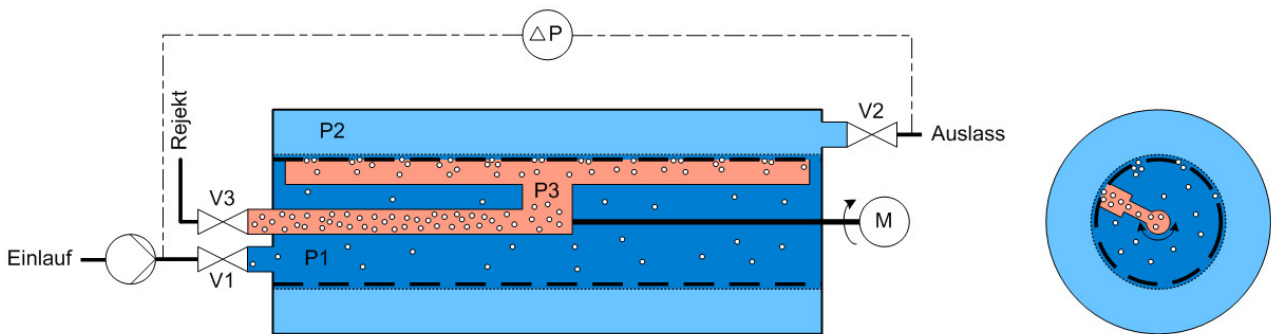


Abbildung 10: Schematischer Aufbau und Funktion des *OptiFil* Filtersystems während der Rückspülung

4.4.2 Versuchsaufbau – Pilotanlage und Einbindung

4.4.2.1 Pilotanlage

Für die Standzeituntersuchungen dieser Arbeit wurde eigens eine mobile Pilotanlage gefertigt. Ein Beweggrund für den Bau dieser Anlage war, Fehler, die durch den Scale Up von Laborvorversuchen entstehen, möglichst gering zu halten. Beispielsweise erlaubt die idente Bauweise des Pilotfilters mit dem Rückspülfilter in größerer Ausführung gleiche strömungstechnische Voraussetzungen im Inneren des Apparats. Der Einfluss des im Labormaßstab schwer zu realisierenden zyklischen Abreinigungsvorganges kann so auch bereits in der Pilotierung berücksichtigt werden. Ein weiterer Anstoß zur Fertigung war die geforderte Durchführbarkeit von Langzeitversuchen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Der permanente Betrieb des Filters erlaubt zeitliche Veränderungen von Prozessparametern und deren Auswirkung auf die Filtration darzustellen.

Einen bedeutenden Teil der vorliegenden Masterarbeit stellte somit die Projektabwicklung des Pilotanlagenaufbaus dar. Angefangen bei der Planung über die Beschaffung der Komponenten bis hin zur Fertigung und Inbetriebnahme der Anlage. Im Zuge dessen folgte auch eine Neukonzipierung der Steuereinheit auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS).

Die für den Betrieb des Filters notwendigen Anlagenkomponenten inklusive Steuerung sind in einem selbst tragenden Rahmen angeordnet und verrohrt. Als Filterapparatur wurde ein automatischer Rückspülfilter der Baureihe *OptiFil*, Typ 150-180 mit einer Filterfläche von 3,82 [dm²] gebaut. Mit dieser Anlage besteht die Möglichkeit, in bestehenden Prozessen Pilotierungsversuche durchzuführen, wobei verschiedene Prozessparameter eingestellt und unterschiedliche Prozessführungen untersucht werden können.

Abbildung 11 zeigt das Fließbild der gebauten Pilotanlage. Das zu filtrierende Medium wird mit Hilfe einer Kreiselpumpe (P001) über einen Pumpenschutz (Strainer, F001) angesaugt und in den Rückspülfilter (F002) gefördert. Das Rejekt und das Filtrat werden an der Oberseite des Filterapparates abgezogen. Die filtratseitige Verrohrung ist so ausgeführt, dass verschieden Arten von Rückspülungen untersucht werden können. Diese Rückspülvarianten sind anschließend im Kapitel 4.4.2.2 beschrieben.

Während des Betriebes werden der Durchfluss an Filtrat und Rejekt als auch der filtrat- und zulaufseitige Betriebsdruck sowie die Rejektmenge pro Rückspülung kontinuierlich aufgezeichnet. Eine Temperaturmessung erfolgt in der Zulaufleitung des Filters. Ergänzend sind in der Zu- und in den Ablaufleitungen des Filters Entnahmestellen für Proben installiert.

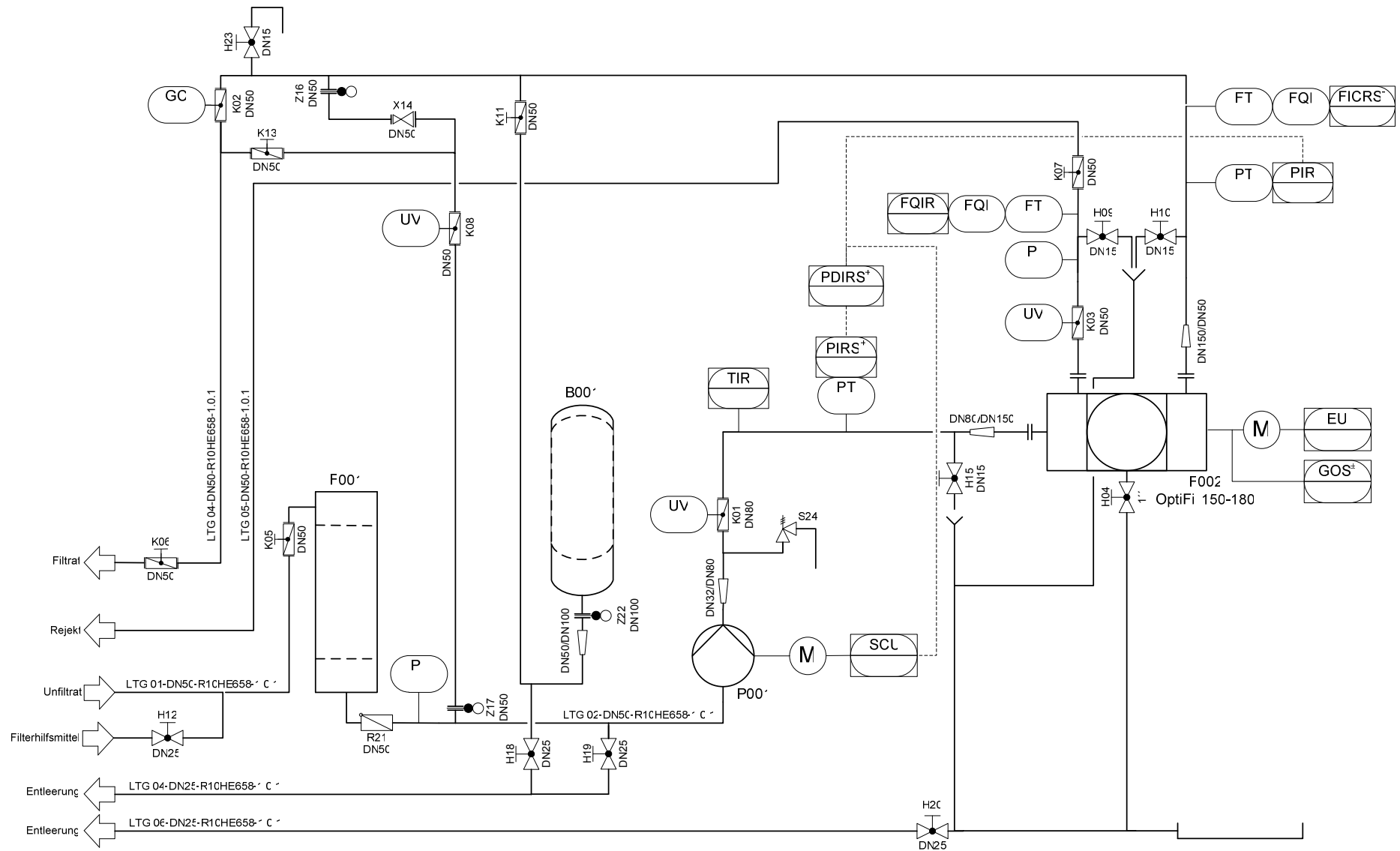


Abbildung 11: R&I-Schema der Pilotanlage *OptiFi* 150-180

4.4.2.2 Betriebsweisen - Rückspülvarianten

Standardrückspülung:

Die Standardrückspülung erfolgt wie in Abschnitt 4.4.1 erläutert. Nach einer definierten Filtrationszeit, oder bei einer bestimmten Druckdifferenz über das Filtermedium, findet eine einmalige Rückspülung statt. Dazu öffnet die in der Rejektleitung befindliche, pneumatisch angetriebene Automatikklappe (K03) und der drehzahlgeregelte Motor der Rückspüleinrichtung startet. Hat die Rückspüleinrichtung die Ausgangsposition wieder erreicht, schließt die Rejektklappe und der Rückspülvorgang ist abgeschlossen.

Optional kann vor der Abreinigung mit Hilfe der in der Filtratleitung eingebauten Regelklappe (K02) der Filtratdruck eingestellt werden. Der zur Rückspülung verfügbare Differenzdruck ergibt sich aus dem Filtratdruck vermindert um den Gegendruck (Druckverluste) der Rejektleitung.

Rückspülung mit Filtratrückführung:

Bei dieser Rückspülvariante wird vor dem Öffnen der Rejektklappe das erzeugte Filtrat über eine Zirkulationsleitung rückgeführt (K11 öffnet, K02 schließt). Diese Kreislaufführung soll eine Ausreinigung des Filterapparates bezwecken, sodass einerseits im Filtrat noch vorhandene Verunreinigungen an der bereits entstandenen Deckschicht abgeschieden werden und reineres Filtrat zur Rückspülung zur Verfügung steht. Andererseits soll der Trübstoß nach der Abreinigung zeitlich verzögert werden, um eine filtratseitige Beladung des Filtermaterials während der Rückspülung zu minimieren.

Rückspülung mit Blasenspeicher:

Des Weiteren ist in der Anlage ein Blasenspeicher (B001) mit dem Fassungsvermögen von 32 [L] in der Filtratleitung integriert. Der Speicher hat die Aufgabe, bei dieser Rückspülart das erforderliche Filtratvolumen (entspricht der Rejektmenge) zur Verfügung zu stellen. Bei dieser Prozessvariante wird vor der Abreinigung des Filtermittels der Filtratablauf (K02) geschlossen und der Speicher mit dem zuletzt erzeugten Filtrat gefüllt. Ist ein definierter Fülldruck erreicht, schließt die Automatikklappe des Zulaufs (K01), die Pumpe schaltet ab und der Abreinigungsvorgang wird gestartet.

Abbildung 12: Pilotanlage *OptiFil* 150

4.4.2.3 Einbindung der Pilotanlage

Zur Ermittlung der Standzeit von verschiedenen Filtermitteln und Rückspülarten wurde die unter Abschnitt 4.4.2.1 beschriebene Pilotanlage in die Prozesskette der werksinternen Abwasserreinigungsanlage, kurz ARA, eingebunden. Als letzter Verfahrensschritt der Abwasseraufbereitung ist das mit Schwebstoffen und partikulären Verunreinigungen beladene Wasser vor der Einleitung in den Vorfluter noch zu filtrieren. Dies bewerkstelligt eine Kiesfilteranlage mit acht Schüttgutbecken.

Von der Nachklärung kommend gelangt das behandelte Wasser in ein Sammelbecken. Von dort aus speisen vier Pumpen die Kiesfilterbecken. Die Versuchsanlage wurde zu den Versorgungspumpen in Bypass installiert. Die Entnahme des Prozessmediums war pumpendruckseitig angeordnet, wodurch ein Vordruck von 0,6 [bar] zur Verfügung stand. Das erzeugte Filtrat und Rejekt wurden in das Sammelbecken zurückgefördert. Abbildung 13 stellt die Einbindung schematisch dar.

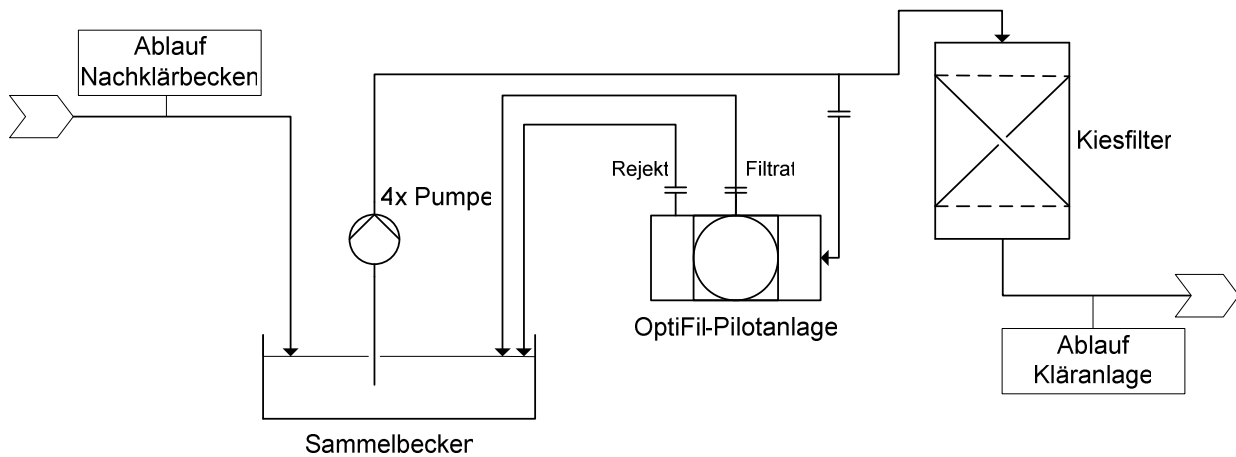


Abbildung 13: Einbindung der Pilotanlage in den Kläranlagenprozess

4.4.3 Analytik

4.4.3.1 Abfiltrierbare Stoffe

Zur Überprüfung des Feststoffgehaltes der Suspension diente die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe nach DIN EN 38 409-H2.^[24] Für die Messung werden 1000 [mL] einer homogenisierten Probe durch einen trocken eingewogenen Glasfaserfilter (0,45 [µm] Abscheidung) filtriert. Der beladene Filter wird erneut getrocknet und gewogen. Aus der Massendifferenz berechnet sich der Feststoffgehalt in [mg/L]. Die Ermittlung übernahmen Mitarbeiter des Analysenlabors der Abwasserreinigungsanlage der Firma *Lenzing AG*.

4.4.3.2 Lichtmikroskopie

Zur optischen Analyse der einzelnen Filtergewebe kam ein Stereoauflichtmikroskop der Unternehmung *Leica Microsystems* vom Typ MZ 16A zum Einsatz. Die Filterflächen wurden an- und abströmseitig in 7,1- und 80-facher Vergrößerung analysiert. Die mikroskopische Untersuchung der Filtermaterialien wurde vom Mikrofotolabor der Firma *Lenzing AG (TIQT)* durchgeführt.

4.4.4 Versuchsdurchführung

Zu Beginn eines Versuches ist der Rückspülfilter zu öffnen und das Filtermaterial mit dem Stützgewebe auf den Lochmantel zu spannen. Nach dem Füllen der Anlage erfolgt die Parametrierung der Steuerung. Die Untersuchungen werden so durchgeführt, dass ein bestimmter Differenzdruck zwischen Feed- und Filtratraum die Rückspülung auslöst, der Rückspüldruck (Filtratdruck) konstant ist und der Durchsatz während der Filtration an das

Filtermittel angepasst wird. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Rückspüleinrichtung ist so eingestellt, dass bei jedem Versuch anfänglich die gleiche Rückspülmenge zur Abreinigung des Filtermittels durchströmt (Rejekt pro Rückspülung ist konstant). Die Aufzeichnung von Feed- und Filtratdruck, Volumenstrom an Filtrat und Rejekt erfolgt im Sekundentakt, die Temperaturaufzeichnung im Minutentakt.

Bei den Filtermitteltests wird der Filtratdruck durch das eingebaute Überströmventil (X14, Abbildung 11) erzeugt.

Die Einstellungsparameter der Anlage für Filtermaterialuntersuchungen sind:

Rückspülart:	einfache Rückspülung (Standardrückspülung)
Rückspülauslöser:	fixer Differenzdruck am Filtermaterial (ΔP_{fix})
Auslösedifferenzdruck ΔP_{fix} :	0,6 [bar]
Rückspüldruck P_2 :	2 [bar]
Anfängliche Rejektmenge:	4 [L]

Zur Erprobung der Rückspülart Filtratrückführung ist zu den oben angeführten Parametern noch die Zirkulationsmenge einzustellen. Für diese Versuche wurden 75, 100 und 150 [L] gewählt; wobei ersteres einem einmaligen Austausch des Kreislaufmediums entspricht.

Die Parametrierung der Rückspülart Blasenspeicher entspricht auch denen der Filtermaterialversuche. Ausnahme bildet der Rückspüldruck. Der Speicher wird nach Erreichen des Auslösedifferenzdruckes auf 3,8 [bar] aufgedrückt, welcher Wert dem anfänglichen Rückspüldruck gleichzusetzen ist.

Während der Versuchszeit wird mehrfach eine Probe von Feed und Filtrat gezogen und zur Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe jeweils zu Mischproben pro Entnahmestelle vermengt. Der Versuch gilt als beendet, wenn das Filtermaterial zugewachsen ist. Der Filter wird anschließend abgeschaltet, entleert und geöffnet. Das Filtermaterial ist für die mikroskopische Oberflächenbetrachtung auszubauen.

4.4.5 Auswertung der Versuchsdaten

Um Aussagen über das Standzeitverhalten der verschiedenen Filtermaterialien zu erhalten, wurden die elektronisch aufgezeichneten Prozessdaten (siehe Abschnitt 4.4.2.1) mittels der Software *Microsoft Excel 2003* ausgewertet.

Die folgenden Diagramme (Abbildung 14 und Abbildung 15) zeigen exemplarisch einen Ausschnitt der aufgezeichneten Versuchsdaten. Man erkennt den charakteristischen Verlauf der Rückspülzyklen.

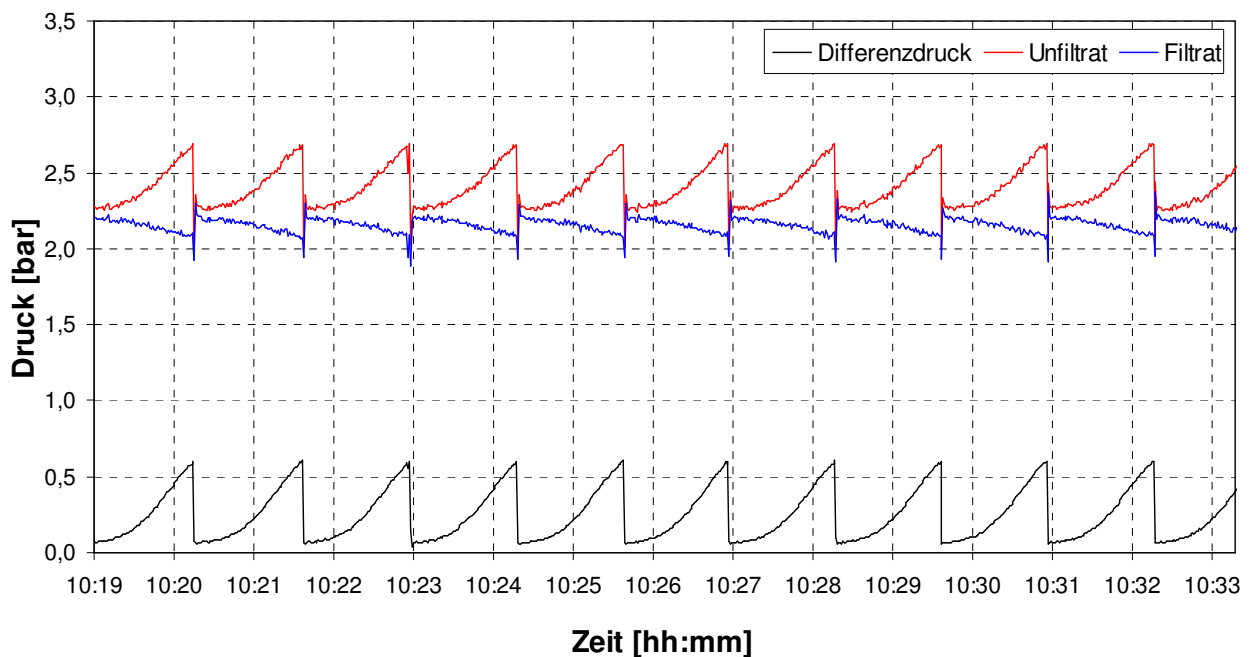


Abbildung 14: Druckverlaufaufzeichnung eines Versuches; Feed-, Filtrat- und Differenzdruck; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar]; $P_2 = 2$ [bar]

Während der Filtrationsphase steigt der Differenzdruck aufgrund der zunehmenden Beladung des Filtermaterials an, der Filtratstrom sinkt durch den zusätzlichen Strömungswiderstand der abgetrennten Verunreinigungen. Ist der Auslösedifferenzdruck erreicht, wird die Verschmutzung vom Filtermaterial abgereinigt und der Differenzdruck sinkt theoretisch wieder auf seinen Anfangswert. Der Durchfluss an Filtrat bricht während der Regeneration weiter ein, da der zur Rückspülung benötigte Anteil als Rejekt ausgeschleust wird.

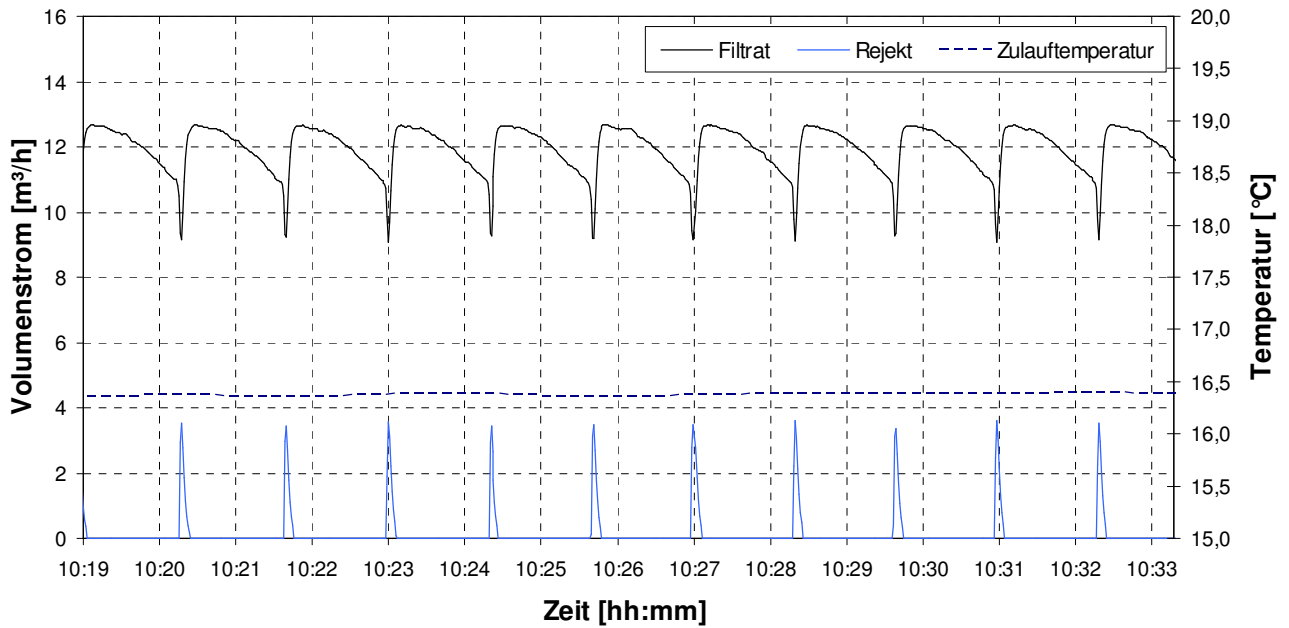


Abbildung 15: Durchfluss- und Temperaturaufzeichnung eines Versuches; Filtratstrom, Rejektstrom und Zulauftemperatur; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar]; $P_2 = 2$ [bar]

Der zur Auswertung herangezogene Versuchszeitraum beginnt, wenn durch Einstellung der Anlage die gewünschten Versuchsstartbedingungen erreicht wurden, unter anderem die anfängliche Rejektmenge pro Rückspülung und der Rückspüldruck.

Durch die zunehmende Verblockung des Filtermaterials erreicht die Differenzdruckkurve nach der Rückspülung nicht mehr den anfänglichen Differenzdruck ΔP_0 , wodurch sich die Rückspülzyklen verkürzen und die Rejektmengen pro Rückspülung vermindern. Als Versuchsende wurde der Zeitpunkt gewählt, von dem an sich der Differenzdruckabbau zunehmend verschlechterte. In Abbildung 16 ist beispielhaft ein zur Auswertung herangezogener Versuchszeitraum dargestellt.

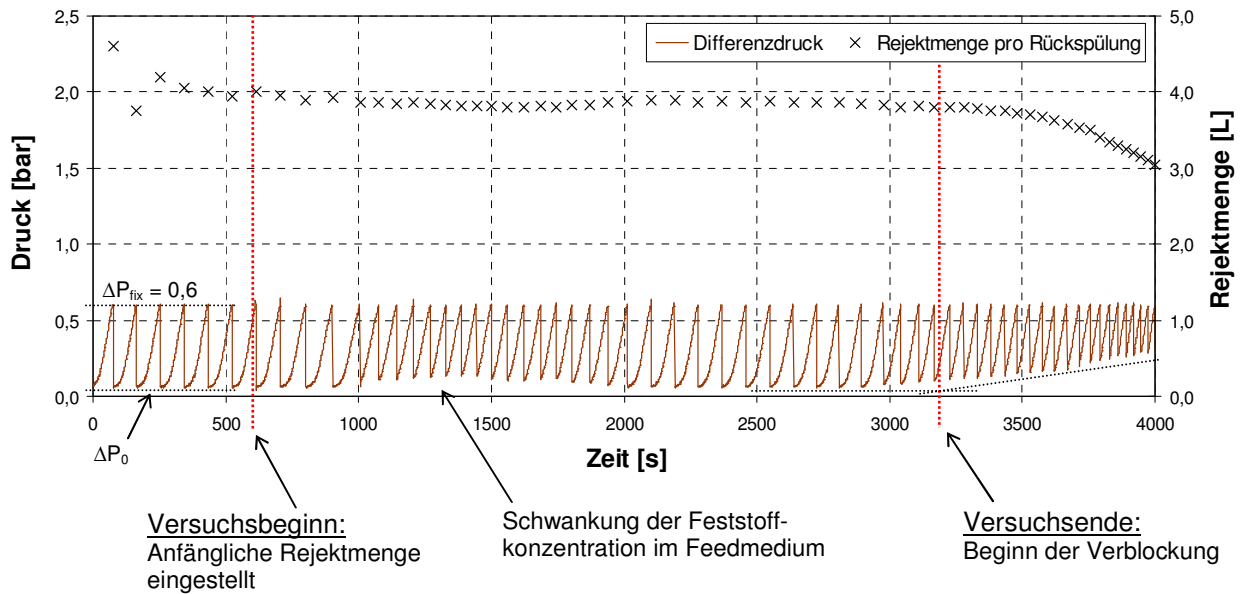


Abbildung 16: Druckdifferenz- und Rejektmengenverlauf von Rückspülzyklen; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar], anfängliche Rejektmenge = 4 [L] pro Rückspülung

Für den definierten Zeitraum sind die Rückspülanzahl, der durchschnittliche Filtratstrom, die Filtratsumme, die Versuchsdauer und die Filterleistung aus den Schreiberdaten berechnet worden. Zur weiteren Bewertung der Untersuchungen diente die Aufzeichnung der Rejektmengenänderung über die Rückspülanzahl. Dieser Verlauf wurde durch eine Gerade angenähert. Die Steigung der Gerade ist ein Indikator für die Verblockungseigenschaft.

4.4.6 Ergebnisse und Vergleich

4.4.6.1 Ergebnisse

Die Untersuchungen im Prozess der Abwasserreinigungsanlage umfassten insgesamt 23 Versuche, 16 davon für Filtermitteluntersuchungen und sieben zur Erprobung verschiedener Fahrweisen. Auf die Auflistung der ausgewerteten Daten aller Versuchsreihen wird an dieser Stelle verzichtet, die wichtigsten Daten sind bei den folgenden Vergleichen angeführt. Der vollständige Datensatz ist in Tabelle 22 und Tabelle 23 im Anhang nachzulesen.

Zur Überprüfung, ob der Widerstand eines Filtermaterials Einfluss auf die Rückspülbarkeit und somit auch auf Filterstandzeit hat, wurden die im Labor ermittelten Versuchsergebnisse aus Kapitel 4.3.3 (Tabelle 4) über die Rückspülanzahl der Filtermittelstandzeitversuche aufgetragen. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass sowohl

mit hohem aber auch mit niedrigem Filterwiderstand eine große Rückspülanzahl erreicht werden kann. Der Einfluss des Widerstandes hat daher eine untergeordnet Rolle, die geometrische Form der filtrierenden Schicht dominiert das Standzeitverhalten. Speziell die Anwendungen mit Tressengewebe in Leinenbindung erzielten bei den Versuchen schlechtere Abreinigungsergebnisse, ersichtlich in Abbildung 17.

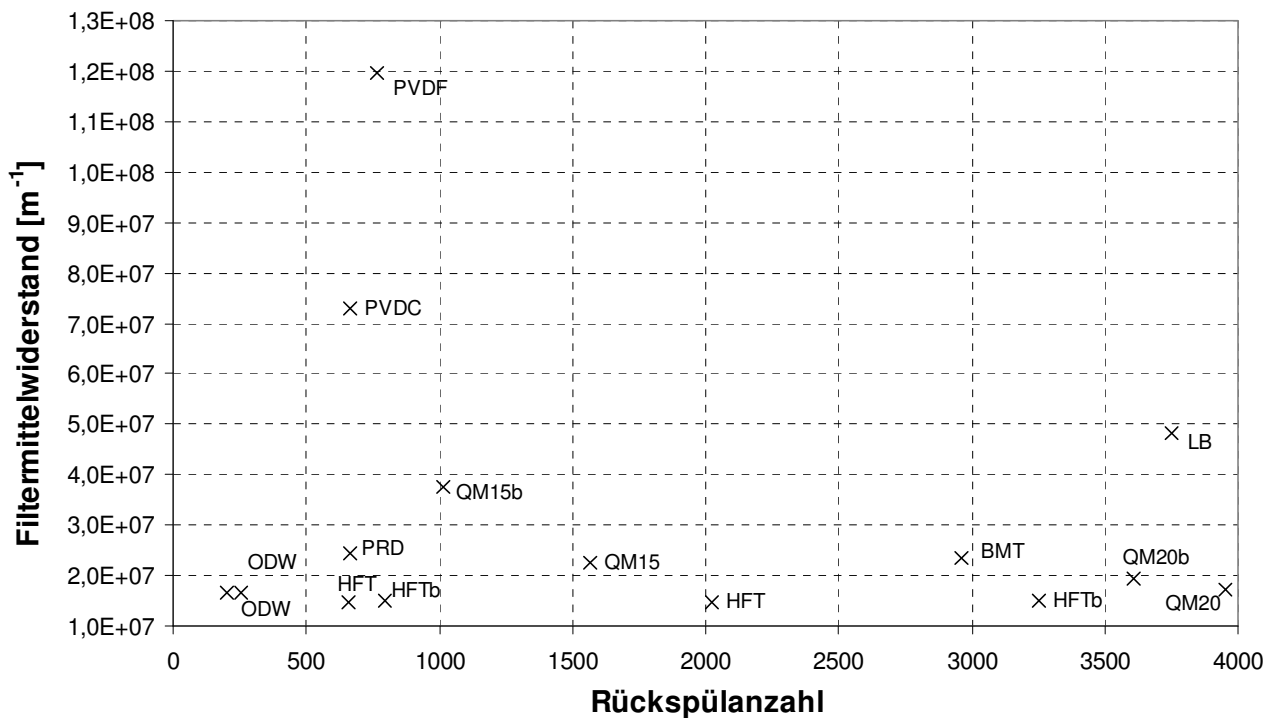


Abbildung 17: Filtermittelwiderstand über Rückspülanzahl; Ergebnisse der Filtermaterialversuchsreihen

Die ausgewerteten Rejektmengensteigerungen beschreiben die Änderung der Rückspülmenge mit der Abreinigungszykluszahl. Es handelt sich um negative Werte, da erwartungsgemäß die Filtermaterialdurchströmung mit zunehmender Rückspülanzahl abnimmt. Grund für den Abfall der Durchströmungsmenge kann eine im Zuge der Rückspülung filtratseitige Ablagerung von Partikeln sein. Es handelt sich hierbei um Teilchen, die während der Filtration das Filtermittel passieren konnten und beim erneuten Durchströmen der Filterschicht jedoch abgeschieden werden. Andererseits können abgetrennte Feststoffe so stark an der Filtermaterialoberfläche haften, dass die hydrodynamischen Kräfte nicht zur Abreinigung ausreichen und die durchströmbare Fläche reduziert wird. Je eher die Steigung dem Wert Null entspricht, desto größer ist die Anzahl der Rückspülzyklen mit annähernd gleicher Filtratmenge, die bei der Regenerierung über das Filtermittel fließt. Tabelle 6 enthält die berechneten Daten der Versuchsreihen in aufsteigender Reihenfolge, wobei die Werte der Untersuchungen

verschiedener Fahrweisen farblich hinterlegt sind. Man erkennt, dass vorrangig Quadratmaschengewebe einen geringen Steigungswert haben. Das untersuchte Nickelblech zeigte in Bezug auf die Durchflussmenge pro Rückspülung einen minimalen Abfall. Die Tressengewebe in Leinwandbindung (PRD und ODW) weisen eine schnellere Abnahme der Reinigungsmenge mit der Zyklusanzahl auf. Ausnahme bilden die HFT-Tressen (behandelt oder unbehandelt), die durch die Abscheidungsgrenze von 25 [μm] offener sind als die Tressen mit 20 [μm].

Tabelle 6: Ermittelte Steigungen der Rejektmengenverläufe über die Rückspülanzahl

Filtermittel	Rejektmengen- steigung	Filtermittel	Rejektmengen- steigung
LB	-1,85E-04	HFT	-2,31E-03
HFTb	-3,19E-04	ODW ($P_2 = 3,8$ [bar])	-2,36E-03
QM20	-4,13E-04	PRD	-2,70E-03
HFT	-6,22E-04	ODW (FRF 75 [L])	-3,82E-03
QM20b	-7,02E-04	QM15 (Blasenspeicher)	-4,36E-03
BMT	-7,74E-04	ODW ($\Delta P_{\text{fix}} = 0,3$ [bar])	-5,03E-03
ODW (Blasenspeicher)	-9,20E-04	ODW	-5,95E-03
PVDC	-9,81E-04	ODW	-8,03E-03
PVDF	-1,04E-03	V301	-9,65E-03
QM15	-1,33E-03	ODW (FRF 100 [L])	-1,32E-02
QM15b	-1,66E-03	ODW (FRF 150 [L])	-2,32E-02
HFTb	-2,03E-03		

Folgend wird näher auf die Untersuchungen der unterschiedlichen Filtermitteleigenschaften eingegangen.

4.4.6.2 Vergleich der Werkstoffarten

Zur Beurteilung, ob der Werkstoff einen Einfluss auf die Filtrationseigenschaften des Rückspülfilters mit sich bringt, wurden ein Metall- und ein Kunststoffgewebe in Tressenbindung verglichen. Ergänzend dazu wurden Polyvinylidengewebe untersucht, die auf Grund anderer Webart und Filterfeinheit nicht direkt in den Vergleich miteinbezogen werden dürfen. Abbildung 18 stellt die Rückspülhäufigkeiten, die produzierten Filtratsummen und die Feststoffgehalte des Zulaufs der einzelnen Versuchsreihen dar. Die

Kunststoffresse (PRD) zeigt im Vergleich zur Metallresse (ODW) trotz geringerer Feststoffbelastung im Zulauf eine deutlich höhere Rückspülfrequenz. Begründbar ist dies durch den geometrischen Aufbau der Gewebe. Bei der Kunststoffresse weisen die Kett- und Schussfäden dieselbe Fadendicke auf, der Schussfadendurchmesser der Metallresse ist mit einem Drittel des Kettfadendurchmessers kleiner, wodurch ein durchlässigeres Gewebe entsteht. Ein Unterschied zwischen Kunststoff und Metall ist aufgrund der unterschiedlichen Fadenstärken nicht erkennbar.

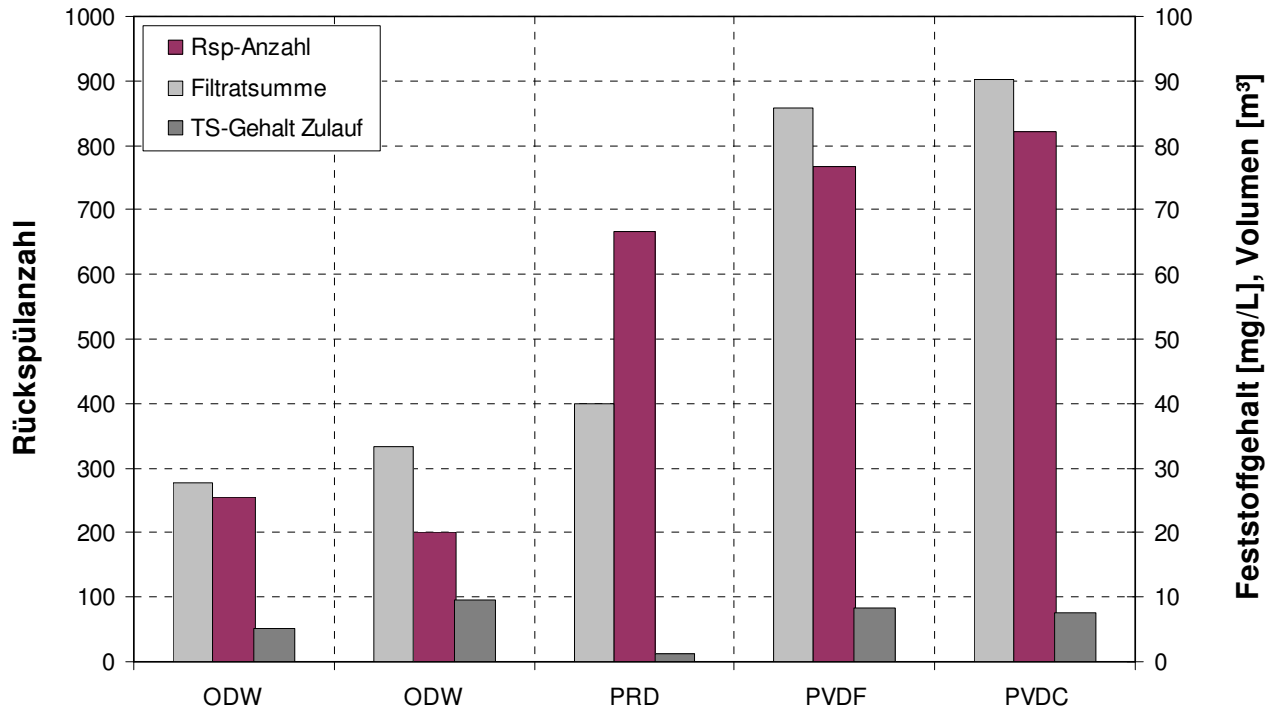


Abbildung 18: Vergleich der Filtermittel aus unterschiedlichen Werkstoffen; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf

Die verwendeten Polyvinylidengewebe lieferten sehr ähnliche Ergebnisse. Sie wiesen in der betrachteten Zeitspanne von 6,5 [h] (PVDC) bzw. 6,2 [h] (PVDF) nur einen geringen Anstieg der Druckdifferenz nach der Rückspülung auf. Ein charakteristischer Verlauf der Verblockung war nicht zu detektieren. Die optische Untersuchung beider Gewebe nach Beendigung der Versuche zeigte, dass nur vereinzelt Verunreinigungen am Filter haften blieben. In Abbildung 19 ist exemplarisch das verwendete PVDC-Filtermittel (anströmseitig) nach dem Gebrauch zu sehen. Die Verwendung dieser Gewebewerkstoffe oder die Beschichtung von Geweben mit diesen Kunststoffarten kann sich positiv auf die Standzeit des Filterapparates auswirken.



Abbildung 19: Anströmseite des PVDC-Versuchfiltergewebes; Versuchsdauer 6,5 [h]; 822 Rückspülungen; Feststoffkonzentration Zulauf:7,6 [mg/L]; 90 [m³] erzeugtes Filtrat

4.4.6.3 Einfluss des Filtermittelaufbaus

Die Gegenüberstellung von Filtermitteln unterschiedlichen Aufbaus ist in Abbildung 20 ersichtlich. Betrachtet werden das Filtervlies (V301), Metalltressen mit Leinwandbindung (ODW) und Körperbindung (BMT) und ein galvanisch hergestelltes Nickellochblech (LB). Das Vlies ist ein mehrschichtiges Filtermaterial, bei dem auf ein stützend wirkendes Quadratmaschengewebe feine Metallfaserschichten unterschiedlicher Faserdicken aufgesintert sind. Es erwies sich speziell bei dieser Anwendung als ungeeignet, da bereits nach 166 Rückspülungen eine Verblockung festgestellt werden konnte. Begründung dafür kann die Metallfaserschicht sein, in der die Verunreinigungen eingelagert werden und nur schwer durch Rückspülung abzureinigen sind.

Das BMT-Gewebe und das Nickelblech zeigten bei den Untersuchungen keine typischen Verblockungscharakteristiken während des Versuchszeitraumes. Durch die Körperbindung des BMT-Filtermittels entstehen weniger Kreuzungspunkte zwischen Kett- und Schussfäden. Ein dadurch offeneres Gewebe kann die längere Standzeit gegenüber den ODW-Tressen begründen. Nachteilig an diesem Gewebe war die geringe Abscheidung. Die verbleibende Feststoffkonzentration von 7,0 [mg/L] im Filtrat ergab eine Abtrennung von 7,9 [%]. Die geringe Abtrennung trägt ebenfalls zur Lebensdauer des Filtermittels bei. Der Filterbetrieb mit dem Nickelblech wurde nach 22,7 [h] und 3750 Rückspülungen abgebrochen. Trotz der langen Versuchsdauer wurden aufgrund der geringen offenen Filterfläche von 10 [%] nur 100,7 [m³] Filtrat gewonnen (siehe Abbildung 20). Der Rejektanteil lag mit 11,77 [%] deutlich über den Werten aller anderen Versuche (1,5-5 [%]).

Bei der mikroskopischen Betrachtung konnten filtratseitig keine anhaftenden Partikeln am Nickelblech nachgewiesen werden. Anströmseitig zeigten sich nur im Bereich der schlitzförmigen Öffnungen Partikelagglomerate, begründbar durch den Filtrationsvorgang vor dem Versuchsstopp.

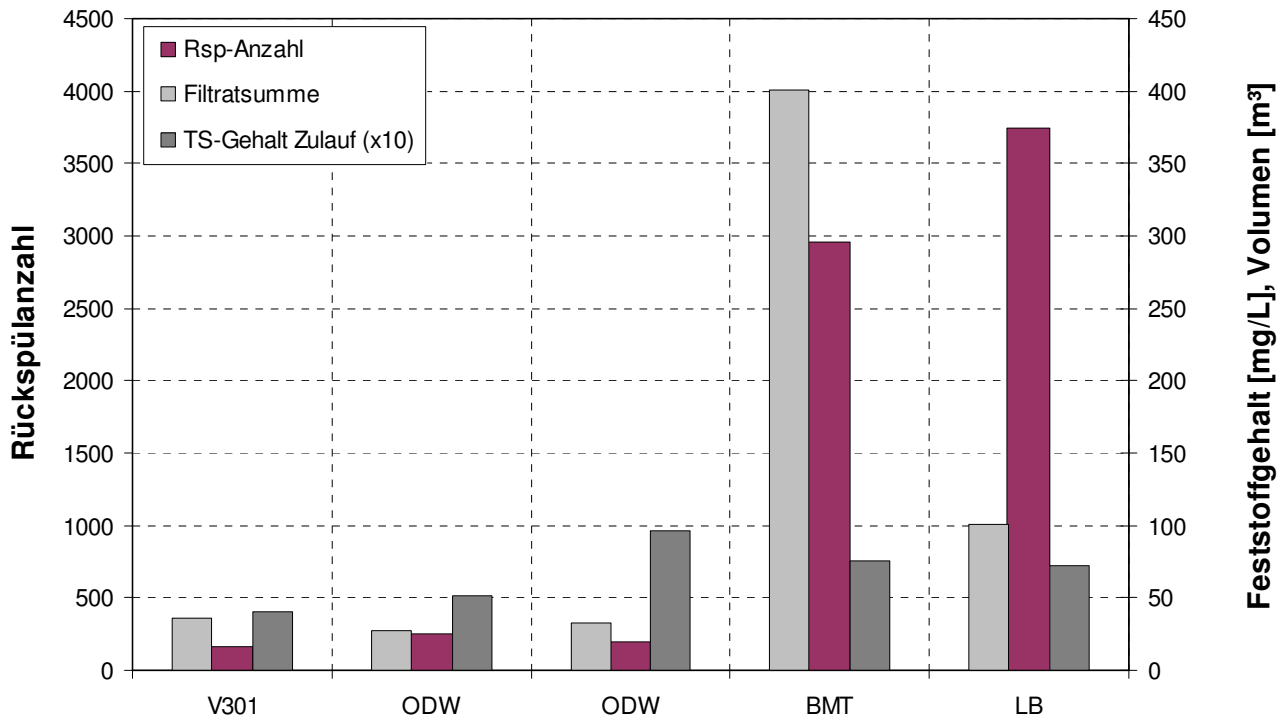


Abbildung 20: Vergleich unterschiedlich aufgebauter Filtermittel; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf

Vergleicht man die Kunststoffresse PRD mit dem Quadratmaschengewebe QM15, erwies sich letzteres bezüglich Standzeit als geeigneter. Die Tresse zeigte nach 667 Rückspülungen erste Verblockungsanzeichen, die Quadratmasche erst 900 Rückspülungen später.

4.4.6.4 Oberflächenbehandeltes Metallgewebe

Die Ergebnisse der elektropolierten Metalltressen zeigten unterschiedliche Tendenzen. In Abbildung 21 sind wiederum die Rückspülanzahl, die Filtratsummen und die Feststoffgehalte des Zulaufs der jeweiligen Gewebe dargestellt. Man erkennt, dass bei den Versuchen mit geringerer Feststoffbelastung höhere Filtratsummen erzeugt wurden aber auch die Rückspülanzahl deutlich zunahm. Vergleicht man die Versuche mit den höheren Zulaufkonzentrationen neigt das behandelte Gewebe 140 Regenerationszyklen später zur Verblockung. Aufgrund des erkennbaren Einflusses der Feststoffkonzentration im Zulauf ist keine eindeutige Tendenz für elektropoliertes Metallgewebe feststellbar.

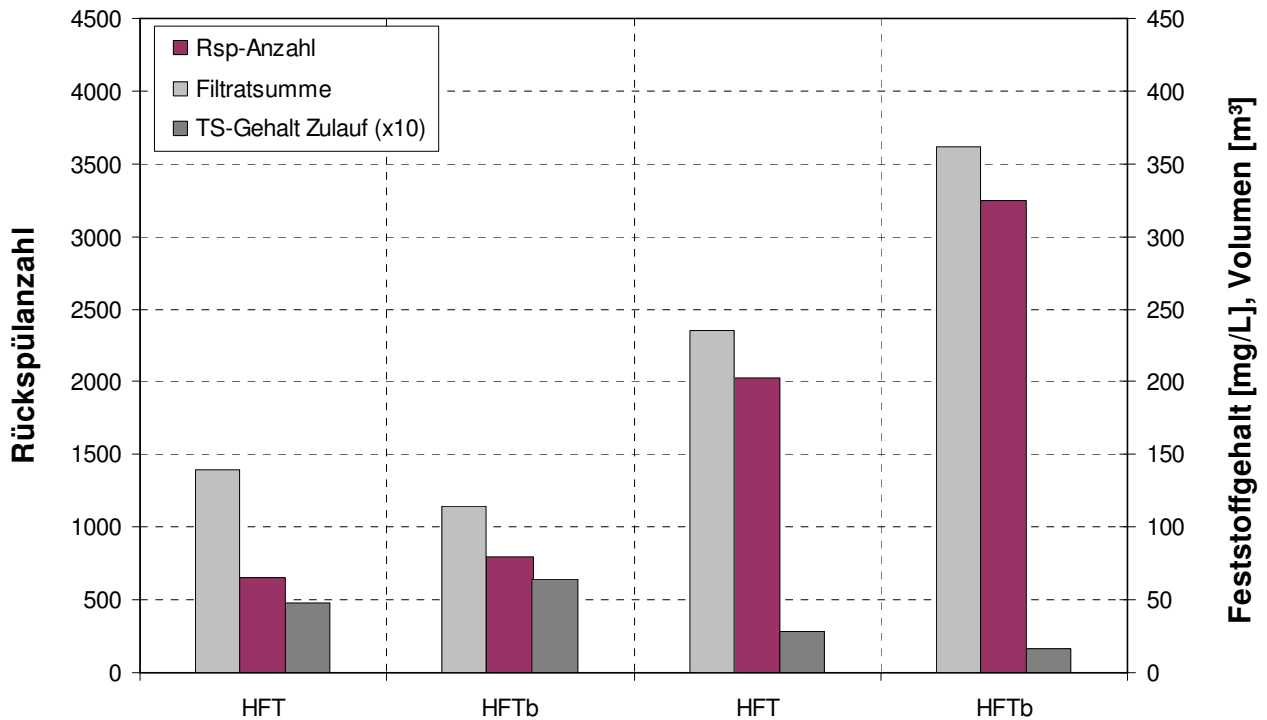


Abbildung 21: Vergleich oberflächenbehandelter Metallgewebe; HFT: unbehandelt, HFTb: elektroliert; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf

Ein Effekt der Oberflächenbehandlung ist in den Mikroskopaufnahmen der Gewebe zu sehen. An der Abströmseite des Filtermittels lagern sich, vor allem im apparatetechnisch bedingten undurchströmten Bereich, durch die Behandlung weniger Verunreinigungen am Gewebe an (Abbildung 22). Der Einfluss der Oberflächenbehandlung von Metallgeweben auf den Filtrations- und Rückspülvorgang muss in weiterführenden Versuchen noch bestätigt werden.

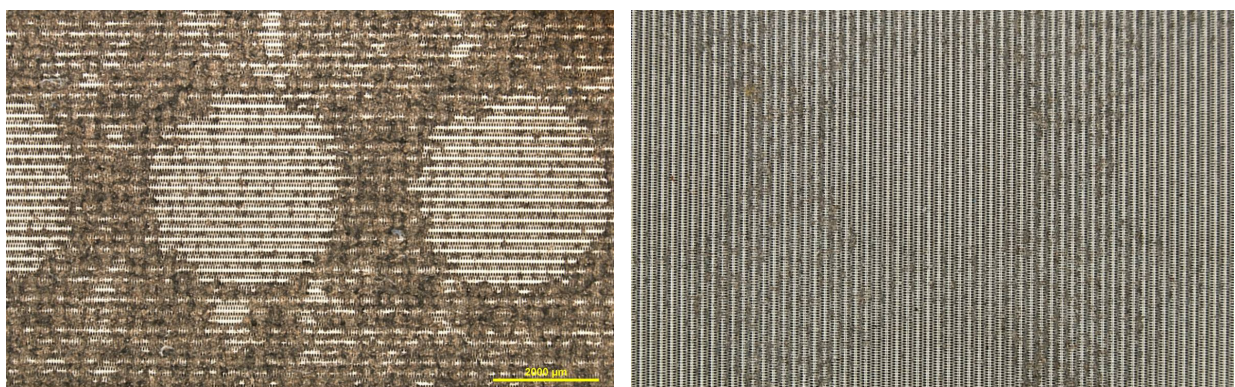


Abbildung 22: Abströmseite von Metalltressengeweben 25 [µm]; links: unbehandeltes Gewebe (HFT) nach 656 Rückspülungen; rechts: elektroliertes Gewebe (HFTb) nach 796 Rückspülungen

4.4.6.5 Oberflächenbehandeltes Kunststoffgewebe

Um den Einfluss der Oberflächenbehandlung von Kunststoffgeweben zu zeigen, werden in diesem Abschnitt PET-Gewebe mit einer Maschenweite von 15 [μm] (hydrophobiert und unbehandelt) und 20 [μm] (hydrophiliert und unbehandelt) miteinander verglichen. Betrachtet man die Versuchsreihen der 15 [μm] Gewebe (QM15, QM15b), so konnte mit dem unbehandelten Filtermaterial eine doppelt so lange Standzeit von 9,5 [h] erzielt werden. Die Rückspülanzahl betrug 1567 mit dem unbehandelten und 1013 mit dem hydrophoben Filtermittel.

Die Quadratmaschengewebe mit den Maschenweiten von 20 [μm] zeigten über die Versuchsdauer keine Verblockungscharakteristik. Der Versuch mit dem hydrophilierten Filtermaterial QM20b endete nach 20,34 [h] mit einer Rückspülanzahl von 3608. Das unbehandelte Filtermaterial QM20 wies nach 33,81 [h] Versuchsdauer 3954 Rückspülungen auf. Ein Einfluss der Hydrophilierung kann hiermit nicht bestätigt werden.

4.4.6.6 Einfluss des Auslösedifferenzdruckes

Zur Bestimmung des Standzeitverhaltens in Abhängigkeit vom maximal am Filtermaterial auftretenden Differenzdruck wurde eine Untersuchung bei geringerem Differenzdruck ΔP_{fix} , abweichend von dem Standardwert anderer Versuche, durchgeführt. Tabelle 7 beinhaltet die Gegenüberstellung der Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Auslösedifferenzdrücken. Durch die geringere zulässige Druckdifferenz werden verhältnismäßig mehr Rückspülungen pro Stunde ausgelöst. Die Daten zeigen, dass die geringere Druckdifferenz zwar die Versuchsdauer nicht erheblich verlängerte, aber das Filtermaterial öfter regeneriert werden kann. Die Feststoffkonzentrationen waren mit 10 ± 1 [mg/L] im Zulauf ident. Im Filtrat wurden jeweils 3,6 [mg/L] ermittelt.

Tabelle 7: Vergleich der Versuchsergebnisse - Auslösedifferenzdruck

Auslösedifferenzdruck ΔP_{fix} [bar]	Versuchsdauer [h]	Rückspülanzahl	Filtratmenge [m ³]
0,3	2,9	297	40,2
0,6	3,4	200	33,2

Die kleinere Druckdifferenz beeinflusst auch die Filtratmenge. Da während der Filtration der Durchströmungswiderstand steigt, bricht der Filtratfluss zunehmend ein. Ein höherer rückspülauslösender Differenzdruck vermindert somit den mittleren Filtratfluss als auch die Filtratsumme, ersichtlich in Tabelle 7.

4.4.6.7 Rückspülung mit Filtratrückführung

Die Erprobung der Rückspülung mit vorgeschaltener Filtratrückführung (FRF) umfasste insgesamt drei Versuche mit unterschiedlichen Rückführmengen. In Abbildung 23 sind die ermittelten Daten grafisch dokumentiert und dem Versuch mit getesteter ODW-Tresse ohne Filtratrückführung gegenübergestellt.

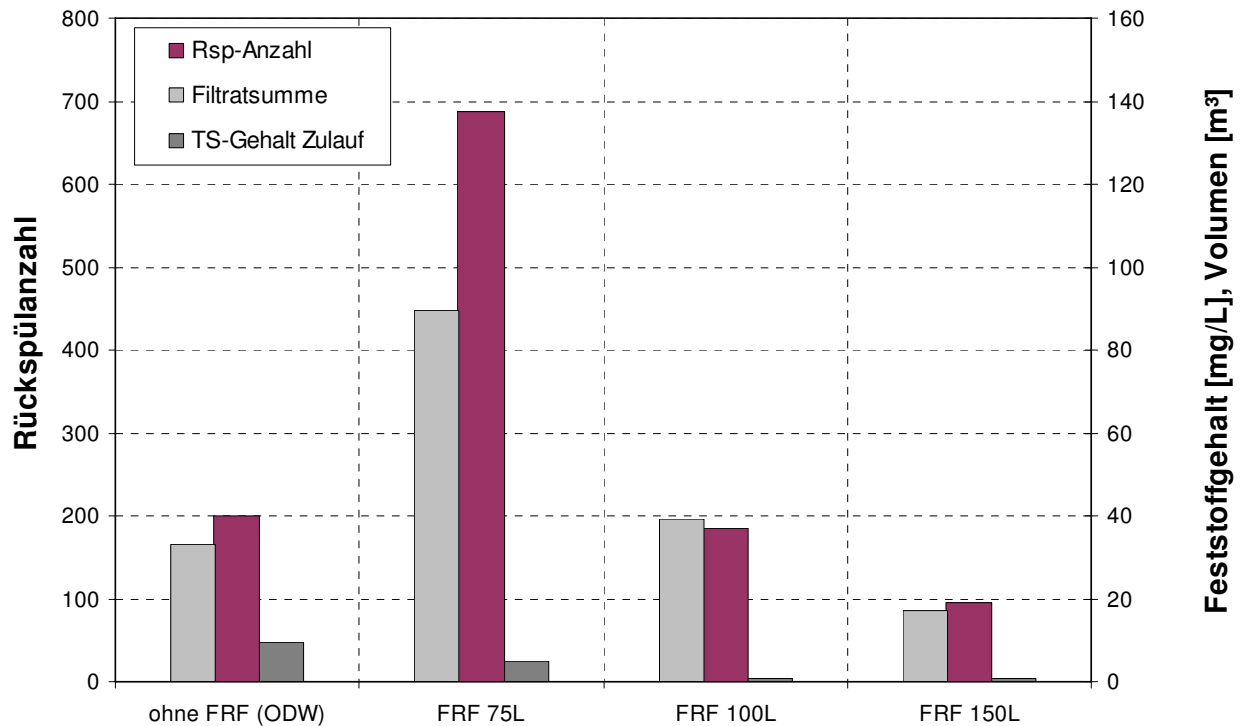


Abbildung 23: Versuchsreihen mit Filtratrückführung verglichen mit der Standardfahrweise; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf

Es zeigte sich, dass bei der Untersuchung mit dem einmaligen Austausch des Kreislaufvolumens (75 [L]) die Rückspülanzahl und die Filtratsumme gegenüber der normalen Fahrweise gesteigert werden konnten. Die Versuche mit 100 bzw. 150 Litern Rückführmenge lassen trotz der niedrigen Zulauffeststoffkonzentration von 0,8 [mg/L] ein schlechteres Verhalten erkennen. Eine mögliche Erklärung ist in der Prozessführung zu finden. Während der Filtratrückführung fehlt der saugseitige Widerstand der Rohrleitung, weshalb der Durchfluss steigt. Die veränderten Strömungsbedingungen bei der Zirkulation beeinflussen im negativen Sinn, beispielsweise durch das Eindrücken der gebildeten Feststoffschicht in das Filtermittel, den Abreinigungsprozess, welcher den gewünschten Effekt der Kreislaufausreinigung überwiegt.

4.4.6.8 Rückspülung mit Blasenspeicher

Die Applikation mit zugeschaltetem Blasenspeicher zur Rückspülung konnte mit einem Tressengewebe 14,7 [h] betrieben werden. Der Vergleich mit dem Versuch ohne Blasenspeicher aber 3,8 [bar] Rückspüldruck weist in etwa eine gleiche Anzahl an Rückspülungen auf (mit Speicher 708, ohne Speicher 725 Abreinigungen). Die Durchführung des Blasenspeicherbetriebs mit einem QM15-Gewebe erzielte eine wesentlich kürzere Standzeit als mit dem Tressengewebe. Es konnten lediglich 28,2 [m³] Filtrat nach 218 Filterregenerationen erzeugt werden. Aufgrund dieser Daten kann nicht eindeutig ein Beweis erbracht werden, ob die Betriebsweise mit zugeschaltetem Blasenspeicher eine standzeitverlängernde Wirkung zeigt. Speziell der Vorteil eines reineren Filtrats konnte nicht nachgewiesen werden. Die Verschmutzungen an der Filtratseite des Filtermittels sind gleicher Größenordnung. Die Anzahlsteigerung der Abreinigungszyklen gegenüber dem Betrieb in Standardfahrweise (siehe Kapitel 4.4.4) kann durch den höheren Rückspüldruck von 3,8 [bar] erklärt werden.

4.4.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Gegenüberstellungen der untersuchten Filtermaterialien zeigten, dass der geometrische Aufbau einen großen Einfluss auf das Standzeitverhalten hat. Das galvanisch hergestellte Filterblech erwies sich bezüglich der zyklischen Abreinigung als vorteilhaft. Nach 22,7 [h] und 3750 Rückspülvorgängen konnten keine Anzeichen einer Verblockung nachgewiesen werden. Erklärbar ist dies mit dem Aufbau und der herstellungsbedingten geringen offenen Filterfläche. Während der Filtration lagern sich die abgetrennten Substanzen direkt an der Oberfläche des Filtermaterials ab, bei Geweben hingegen besteht auch immer die Möglichkeit, dass sich Partikel auch Einlagern oder Verhaken können. Die konische Form (Aufweitung der Schlitze in Filtrationsrichtung) verhindert während der Filtration die Ablagerung von Partikeln im Inneren der Filterschicht und unterstützt zusätzlich die Abreinigungswirkung (Düseneffekt). Die bei allen Versuchen angewandte Fahrweise mit anfänglich konstanter Menge an Rückspülflüssigkeit führt dazu, dass bei geringerer offener Fläche mehr Medium mit höherer Geschwindigkeit durch eine Pore fließen muss. Aufgrund höherer Durchströmungsgeschwindigkeit steigen die auf Partikel wirkenden hydrodynamischen Kräfte, womit die Abreinigung verbessert wird. Die Zunahme der Durchflussmenge begünstigt den Abtransport der Partikel.

Der erwähnte Einlagerungseffekt ist mit der kurzen Standzeit des untersuchten Filtervlieses zu bestätigen. Die versinterten Metallfasern bilden eine Schicht mit

Tiefenwirkung. Durch die Abscheidung und die Strömungsumlenkungen können asymmetrische Partikel unterschiedlich ausgerichtet sein. Dies führt dazu, dass Partikel während der Filtration ins Innere des Filters gelangen, dort aus der Suspension abgetrennt werden und bei der Rückspülung durch eine andere Lage nicht mehr abtransportiert werden können.

Die Untersuchung der verschiedenen Webarten hat gezeigt, dass die Tressengewebe wegen der höheren Durchsatzleistung für den Filterapparat ungeeignet sind. Einerseits tendieren sie dazu, schneller Ablagerungen einzulagern als einfachere offene Quadratmaschengewebe, andererseits entstehen Zonen, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit nicht ausreichend ist, um die Partikel von der Gewebeoberfläche abzureinigen. An diesen Stellen können feine Partikel agglomerieren, sich absetzen und somit den Filter zuwachsen lassen. Die Abbildung 24 zeigt diese Stellen bei einem Tressengewebe in Leinwandbindung.

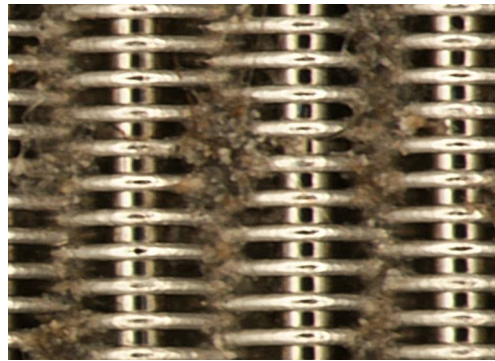


Abbildung 24: Ablagerungen auf einer ODW-Filtertresse an schlecht zu reinigenden Zonen

Im Vergleich zur Tresse neigen Quadratmaschengewebe wegen der Maschenform schneller zu verstopfen. Das heißt, dass der Differenzdruck über das Material nach kürzerer Filtrationszeit erreicht ist und somit in derselben Versuchszeit mehr Rückspülungen nötig sind. Diese Gewebe sind aber im Vergleich zur Tresse besser regenerierbar, weshalb für den verwendeten Filterapparat das Quadratmaschengewebe zu bevorzugen ist.

Weiters ist erkenntlich, dass die Filterfeinheit immer an das jeweilige Partikelspektrum angepasst werden muss. Wählt man Filtermittel mit größerer Porenöffnung verlängert sich auf Kosten der Abscheideleistung die Standzeit. Dies zeigt der Vergleich von den 20 μm und 25 μm Tressen (Abbildung 17), aber auch das untersuchte BMT-Körper-tressengewebe. Andererseits kann die längere Standzeit des BMT-Gewebes durch die andere Bindungsart begründet werden. Die Körperbindung weist weniger Umschlingungen zwischen Kett- und Schussfäden auf wo Partikeln das Anlagern

erleichtert wird. Eine Studie der Karlsruher Universität (Karlsruher Institut für Technologie) bestätigt, dass Gewebe mit mehreren Umschlingungen schlechter abzureinigen sind. ^[22]

Bezüglich bevorzugtem Einsatz von Metall oder Kunststoffgeweben konnte kein Ergebnis erzielt werden. Die Wahl des Werkstoffes ist aufgrund der chemischen Beständigkeit, mechanischen Festigkeit und Wirtschaftlichkeit auf den Prozess abzustimmen.

Der Betrieb des Filterapparates mit den Geweben aus PVDC und PVDF verlief ohne Beeinträchtigung der Filtermittel. Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten kaum Ablagerungen auf den Oberflächen. Erklärbar ist dies durch die Filterfeinheit und die Werkstoffeigenschaften.

Der Vorteil einer Behandlung von Metallgewebe durch elektrochemisches Polieren konnte in den Versuchsreihen nicht eindeutig bewiesen werden. Die reduzierten Ablagerungen an der abströmseitigen Gewebeoberfläche können durchaus mit einer Oberfläche geringerer Rauigkeit begründet werden. Aus diesen Versuchsreihen sind auch der Einfluss der verschiedenen Zulaufkonzentrationen und deren Auswirkung auf die Standzeit gut ersichtlich. Feststoffschwankungen, wie sie während dieser Versuchsreihen auftraten, erschweren den Vergleich der einzelnen Untersuchungen.

Das Kunststoffgewebe mit hydrophobierter Oberfläche neigte bei den Untersuchungen schneller zum Verblocken als das unbehandelte Gewebe. Der gegenteilige Effekt war mit dem hydrophilierten Gewebe nicht feststellbar. Durch diese Resultate ist es nicht nachzuweisen, ob die Oberflächenbehandlung bei der Durchströmung der Gewebe einen Einfluss hat.

Die richtige Parametrierung des Filterapparates ist ein wesentlicher Bestandteil der Betriebsdauer. Es konnte gezeigt werden, dass durch Änderung der Abreinigungsbedingung die Regeneration des Filtermaterials beeinflusst wird. Die vorzeitige Reinigung bei geringerem Differenzdruck verringert bei der Verstopfungsfiltration die Beladung des Filters und erleichtert wegen der geringeren Verweilzeit der Feststoffe die Abreinigung. Nachteilig ist jedoch der zunehmende Rejektmengenanteil.

Die Erprobung der Filtratrückführung lieferte teilweise standzeitverlängernde Resultate. Beim einmaligen Austausch des Kreislaufmediums konnte der Filter länger betrieben werden, als bei der Fahrweise ohne Rückführung. Die Versuchsreihen mit mehrmaligem Austausch des Mediums ließen das Filtermaterial hingegen schneller verblocken. Ursache dafür kann die minimale Feststoffbeladung des Zulaufs sein. Durch die geringe Konzentration kann während der Kreislaufführung kein zusätzlicher Feststoff mehr

abgeschieden werden, jedoch wird durch den Wegfall des saugseitigen Widerstandes (Erhöhung der Durchströmung) der Rückstand vermehrt ins Filtermaterial gedrückt. Dies erklärt die Abnahme der Standzeit mit zunehmendem Rückführvolumen. Eine Umsetzung der Filtratrückführung kann nur Vorteile bringen, wenn während der Zirkulationsphase gleiche Bedingungen wie im Filtrationsbetrieb herrschen und ein ausreichend gebildeter Filterkuchen die Feinanteile durch mehrmaliges Passieren der Suspension abtrennt.

Der Betrieb mit zugeschaltetem Speicher für die Rückspülung zeigte bedingt Verbesserungen. Der höhere Filtratdruck während der Rückspülphase, egal wie dieser erzeugt wird, sorgt beim verwendeten Tressengewebe für die nötige Durchströmungsgeschwindigkeit zur Regeneration des Filters. Der eigentliche Zweck des Speichers, reineres Filtrat zur Rückspülung gewährleisten zu können, wurde nicht bestätigt.

Mit den in der Abwasserreinigungsanlage gewonnenen Erkenntnissen über den Filterapparat konnten standzeitverlängernde Maßnahmen im Spülbadprozess erprobt werden. Diese sind im folgenden Kapitel 4.5 dokumentiert.

4.5 Umsetzung der Standzeitversuche auf den Spülbadprozess

4.5.1 Prozessaufbau und Daten

Das Reinigungsbecken, in dem die Qualität des Bades durch Anwendung des Lenzing Rückspülfilters gesteigert werden soll, ist Teil einer Lackieranlage in der Automobilindustrie. Abbildung 25 zeigt das Blockfließbild des Lackiervorganges. Beginnend werden die Rohkarossen (geschweißt, geklebt und verzinkt) in einem vierstufigen Reinigungs- und Spülprozess (Kaskadenschaltung) von Schmutzstoffen der Vorbehandlung befreit. Zu den Verunreinigungen zählen in erster Linie Fette/Öle von Schmier- und Kühlmitteln, Fasern von Reinigungstüchern sowie Zunder, Schweißperlen und Klebereste von der Fertigung der Karossen.

Im Anschluss folgt die Phosphatierung. Durch die chemische Reaktion der Metalloberfläche mit der im Becken befindlichen, wässrigen Zinkphosphatlösung (Beizen und Phosphatfällung) kommt es zur Konversionsschichtbildung, welche dem Korrosionsschutz dient.^[25] Nach einem mehrstufigen Spülvorgang folgt als letzter Verfahrensschritt die kathodische Tauchlackierung. Bei diesem elektrochemischen

Lackierverfahren werden die Karossen in ein wässriges Lackbad getaucht und ein Gleichspannungsfeld zwischen der Karosserie (Kathode) und Gegenelektrode (Anode) angelegt. Das Bindemittel des Tauchlacks koaguliert aufgrund der Entladung und setzt sich auf der Metalloberfläche ab.^[26] Die anhaftende Lackbadflüssigkeit wird wiederum mit VE-Wasser abgereinigt.

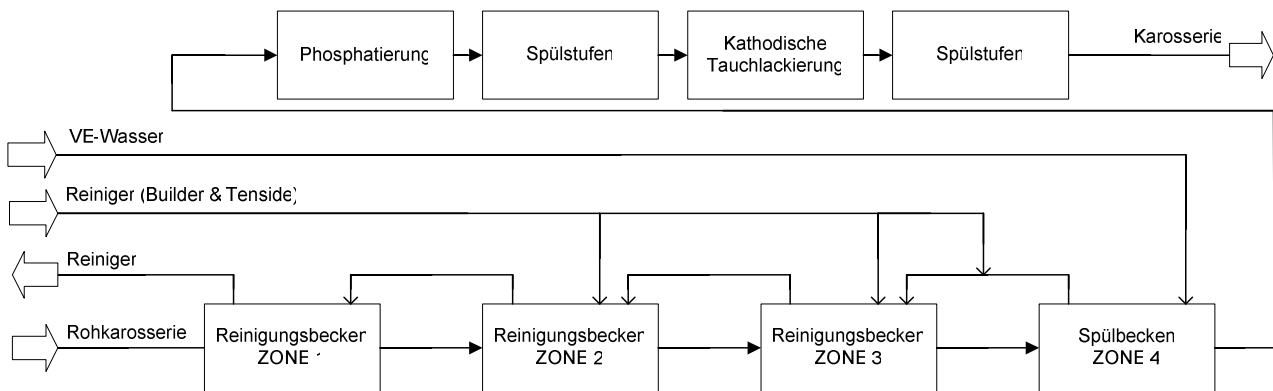


Abbildung 25: Blockfließbild der KTL-Lackieranlage

Vor der Phosphatierung werden die Metallkarossen mit VE-Wasser gespült, um eine möglichst reine Oberfläche zu erhalten und die Verschleppung der Reinigungschemikalien zu minimieren. Dem gebrauchten Wasser wird in einem Zwischenschritt ein flüssiger, alkalischer Reiniger beigemischt und anschließend als Reinigungslösung für die vorgeschaltene Reinigungsstufe verwendet. Reicht die Reinigungswirkung nicht mehr aus, findet das Gemisch im vorherigen Becken für gröbere Verunreinigungen Anwendung. Somit durchläuft der wässrige Reiniger gegen die Transportrichtung der Karossen die Bäder. Ist die Wirkung der Lösung für das erste Becken auch nicht mehr ausreichend, folgt eine Behandlung und Entsorgung der Reinigungslösung.

Während des Betriebes ändert sich permanent die Badzusammensetzung. Dies geschieht, da Reinigungssubstanzen aufgrund der eingebrachten Verunreinigungen verbraucht und durch Haftung an den Karossen verschleppt werden. Folglich ist in den einzelnen Reinigungsstufen eine Nachdosierung der fehlenden Komponenten realisiert.

Das Reinigungsverfahren in Kaskadenschaltung verringert die Entsorgungsmengen an gebrauchtem Reiniger, da keine Abwasserfrachten mit teilweiser Beladung nachbehandelt werden müssen. Um diese Abwasserfrachten weiter zu minimieren bzw. um einen Reiniger möglichst lange in einer Stufe verwenden zu können, sind die Behandlungsbecken mit Aufbereitungsanlagen ausgerüstet.

Die Badaufbereitung mittels Rückspülfilter ist in der zweiten Reinigungsstufe (Zone 2, ausgeführt als Tauchbecken) der Reinigungskaskade realisiert. Bis dato wird zur Reinigung des Zone 2-Bades ein Hydrozyklon mit einer Trenngrenze von 100 [μm] angewandt. Zusätzlich ist eine Einrichtung zur Badumwälzung installiert, in der der Pilotrückspülfilter (Typ *OptiFil* 250-720, Filterfläche 25,15 [dm^2]) im Bypass integriert ist. Das erzeugte Filtrat beider Trennapparate fließt über einen Wärmeübertrager zurück ins Tauchbecken. Der Austrag des Hydrozyklons und das Rejekt des Rückspülfilters werden in ein Sammelbecken geführt und weiter aufbereitet. Mit walzenförmig ausgeführten Magnetabscheidern erfolgt die Abtrennung der metallischen Partikel, der nichtmetallische Anteil gelangt zur zweiten Filtrationsstufe, ausgeführt als Saugbandfilter. Dessen Filtrat wird wahlweise über Beutelfilter zurück in das Becken der Zone 2 oder in die vorgeschaltene Reinigungsstufe (Zone 1) geleitet.

4.5.2 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

Zu Beginn des Entwicklungsprojektes wurden bereits Versuche im Aufbereitungskreislauf des ersten Reinigungsbeckens durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigten aufgrund der Verblockung des Filtermaterials eine maximale Standzeit von 14 Tagen. Als Filtermaterial war ein 100 [μm] Quadratmaschengewebe aus Edelstahl im Einsatz. Die Rückspülung löste bei 1 [bar] Differenzdruck aus.

Mit der Pilotierung in der werksinternen Abwasserreinigungsanlage konnten Kenntnisse über das *OptiFil* Filtersystem bezüglich Filtermaterialwahl und Fahrweisen gewonnen werden. Basierend darauf wurde für den ersten Filtrationsversuch im Zone 2-Bad ein Quadratmaschengewebe aus PVDF mit der Filterfeinheit von 70 [μm] und offener Filterfläche von 22 [%] installiert. Der Auslösedifferenzdruck ΔP_{fix} wurde wie bei den Pilotierungsversuchen in der Abwasserreinigungsanlage mit 0,6 [bar] festgelegt. Eine Filtratrückführung ist ebenso im Spülbadprozess realisiert. Diese ist so eingestellt, dass es zum einmaligen Austausch des Mediums im Zirkulationskreislauf kommt. Die gesamte Parametrierung des Filters ist im Anhang enthalten (Tabelle 24).

Der Durchsatz während der Filtration beträgt 160 [m^3/h], der Filtratdruck P_2 2 [bar]. Vor der Rückspülung steigt wegen des geringeren Querschnitts der Filtratrückführleitung der Filtratdruck auf ca. 3 [bar] an. Der für die Rückspülung zur Verfügung stehende Differenzdruck beträgt vermindert um den Druckverlust der Rejektleitung 2,7 [bar].

Mit dieser Fahrweise wurde bereits eine Standzeit von 24 Tagen erreicht. Eine Verblockung des Materials war noch nicht zu detektieren. Die Filtrationszyklen betragen je nach Menge des Schmutzeintrages 30-35 Minuten. Für den künftigen Betrieb soll der Durchsatz noch auf 200 [m³/h] gesteigert werden.

4.5.3 Ausblick

Nach Beendigung und Analyse dieses ersten Versuches im Zone 2-Tauchbad, können noch weitere Optimierungsschritte am *OptiFil* Filterapparat umgesetzt werden.

Einen wesentlichen Einfluss hat die Veränderung der Filterfeinheit. Durch den Einsatz eines Gewebes mit geringerer Maschenweite können feinere und daher noch mehr Verunreinigungen abgetrennt werden. Bei der Anpassung ist darauf zu achten, dass durch die zunehmende Rückspülfrequenz das stündlich ausgetragene Rejektvolumen nicht die Kapazität der nachgeschalteten Aufbereitungsstufen überschreitet. Eine effizientere Abscheidung von Feingut kann die Filtermaterialstandzeit verkürzen.

Eine effizientere Abscheidung ist auch durch eine Erhöhung des maximal zulässigen Differenzdruckes erreichbar. Bilden die abgeschiedenen Verunreinigungen eine gut durchströmbare Schicht, ist der Kuchenaufbau zur Abtrennung kleinerer Partikel als vorteilhaft anzusehen. Es muss jedoch untersucht werden, ob sich die längere Verweilzeit der Verschmutzungen nachteilig auf die Regenerierbarkeit des Filtermittels auswirken.

Eine weitere Eingriffsmöglichkeit stellt die Abreinigungsgeschwindigkeit der beladenen Filterfläche dar. Eine kürzere Rückspülzeit ist mit einer geringeren Austragsmenge verbunden, wodurch dem vorhin erwähnten maximalen Rejektvolumenstrom entgegengewirkt wird. Nachteilig ist daran, dass eine geringere Menge, die der Regenerierung des Filtermittels zur Verfügung steht, die Abreinigungswirkung vermindert. Die Einstellung der Anlage muss so erfolgen, dass noch eine ausreichende Standzeit des Filtermaterials gegeben ist.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit hatte das Ziel, den Einsatz eines automatischen Rückspülfilters der Firma *Lenzing Technik GmbH* im Aufbereitungskreislauf von schwer filtrierbaren Reinigungsbädern zu ermöglichen. Untersuchungen, die im Zuge eines vorherigen Projektes durchgeführt wurden, wiesen unwirtschaftlich kurze Standzeiten des Filtermaterials auf. In dieser Arbeit konnten standzeitverlängernde Maßnahmen aufgezeigt werden, die den Betrieb des Rückspülfilters in der Badaufbereitung verbessern.

Aufgrund des standzeitlimitierenden Faktors Filtermaterial wurden Untersuchungen durchgeführt, die sich einerseits mit der Ermittlung von geeigneten Filtermaterialien für den Rückspülfilter und andererseits mit der Modifikation des Rückspülvorganges befassen. Ein Screening der am Markt verfügbaren Filtermittel führte zur Erprobung mehrerer Filter mit unterschiedlichen Eigenschaften. Darunter fallen der generelle Aufbau einer filtrierenden Schicht, der Werkstoff, die Webart der differierenden Gewebetypen und Oberflächenänderungen mittels Nachbehandlungsverfahren. Weiters wurden Betriebsweisen mit unterschiedlichen Rückspülarten und die Variation des Rückspülkriteriums Auslösedifferenzdruck analysiert. Zu den untersuchten Rückspülarten zählen neben dem standardisierten Abreinigungsvorgang eine Fahrweise mit Filtratrücklauf, die zur Ausreinigung des Filters vor der Rückspülung dienen soll, und ein Betrieb mit Blasenspeicher, der das zur Rückspülung notwendige Medium zur Verfügung stellt. Die Standzeituntersuchungen wurden aus finanziellen Gründen werksintern im Ablauf der Abwasserreinigungsanlage durchgeführt und die Ergebnisse auf den Filterbetrieb im Bäderprozess übertragen. Die Pilotierung erfolgte mit einer Anlage, die im Zuge dieser Arbeit geplant und gefertigt wurde.

Die Ergebnisse der Langzeitversuche zeigten, dass der Aufbau des Filtermittels den größten Einfluss auf die Standzeit hat. Zur Abreinigung eignete sich das erprobte Feinstlochblech am besten. Nach 22,7 [h] und 3750 Reinigungszyklen konnte keine Verblockungsneigung festgestellt werden. Nachteilig war der hohe Rejektanteil, wodurch die Filterleistung sank. Für den Betrieb mit dem Feinstlochblech wären große Filterflächen notwendig. Die Analyse der Gewebearten führte zur Erkenntnis, dass Quadratmaschengewebe für diese Filterapparatur geeigneter sind als die bisher großteils verwendeten Tressengewebe. Tressengewebe neigen aufgrund ihres Aufbaus eher dazu

Partikel einzulagern bzw. entstehen durch deren Webart Zonen, die durch den Rückspülvorgang nicht ausreichend abgereinigt werden können. Da die Tresse für eine höhere Durchsatzleistung ausgelegt ist, wird zur effektiven Rückspülung mehr Filtrat benötigt. Steht dieses nicht zur Verfügung, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit und die Abreinigung verschlechtert sich.

Die getesteten Polyvinylidengewebe wiesen bei der mikroskopischen Analyse wenig anhaftende Verunreinigungen auf. Ein Vorteil von Metallgeweben gegenüber einer Ausführung in Kunststoff konnte nicht dargelegt werden. Eine standzeitverlängernde Wirkung durch den Einsatz von elektrochemisch behandelten Metallgeweben und hydrophobierten bzw. hydrophilierten PET-Geweben wurde nicht eindeutig bewiesen. Dies muss in weiterführenden Versuchen noch untersucht werden.

Weiters sind im Labormaßstab Filtermittelwiderstandsdaten ermittelt worden, welche als zusätzliche Vergleichsbasis für die Standzeitversuche dienen. Die Auswertung brachte hervor, dass der Filtermittelwiderstand als Maß für die Permeabilität eine untergeordnete Rolle hat, ausschlaggebend für die Regenerierbarkeit ist der Aufbau des Filtermittels.

Die Erprobung der unterschiedlichen Rückspülarten zeigte nur bedingt standzeitverlängernde Wirkung. Die Rückspülung mit vorgeschaltener Filtratrückführung brachte im Vergleich zur Fahrweise ohne Rückführung nur bei einmaligem Mediumaustausch eine Verbesserung. Die Versuchsdauer und die Rückspülanzahl konnten auf das Vierfache gesteigert werden. Die Versuche mit längerer Rückführzeit hatten eine kürzere Standzeit. Die Filtratrückführung ist nur bei Anwendungen mit ausreichender Kuchenbildung zu empfehlen. Für die Rückspülvariante mit Blasenspeicher konnte kein eindeutiger Beweis zur Standzeitverlängerung erbracht werden. Mit der Variation des Auslösedifferenzdrucks konnte der Einfluss auf die Regeneration des Filtermaterials bewiesen werden. Die Abreinigung mit halbem Differenzdruck lieferte nur eine geringfügige Verlängerung der Versuchsdauer, das Filtermittel konnte jedoch öfter regeneriert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Standzeituntersuchungen wurden auf den Filtrationsprozess im Bäderkreislauf übertragen. Als Erstausrüstung diente ein Quadratmaschengewebe aus PVDF. Der Auslösedifferenzdruck wurde im Vergleich zu bereits durchgeführten Vorversuchen um die Hälfte reduziert. Mit diesem Filtermaterial und dieser Parametrierung wurde bereits eine Standzeit von 24 Tagen erreicht, wobei bis

zum Abschluss des experimentellen Teils dieser Arbeit noch keine Anzeichen der Verblockung ersichtlich waren.

Das Ziel, standzeitverlängernde Maßnahmen am Rückspülfilter der *Lenzing Technik GmbH* aufzuzeigen und damit den Betrieb im Aufbereitungskreislauf eines Reinigungsbades zu verlängern, wurde erreicht. Weiterführende Untersuchungen können den Prozess noch optimieren. Beispielsweise kann die Filterfeinheit und die Abreinigungszeit des Filters noch variiert und dadurch ein noch effizienterer Betrieb mit ausreichend Standzeit gewährleistet werden.

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitsbereiche der Filtration in Abhängigkeit der Partikelgröße ^[6]	10
Abbildung 2: Bindungsarten Filtergewebe ^[7]	16
Abbildung 3: Gewebearten Filtergewebe ^[10]	16
Abbildung 4: Haftmechanismen zwischen Feststoffpartikeln nach Schubert ^{[12][13]}	18
Abbildung 5: Exemplarischer Potentialverlauf von Partikelwechselwirkungen in flüssiger Umgebung ^[13]	19
Abbildung 6: Komponenten des Drucknutschenprobenaufnehmers	29
Abbildung 7: Schematischer Drucknutschenversuchsaufbau zur Messung des Filterwiderstandes	30
Abbildung 8: Versuchsaufzeichnung Drucknutschenversuch; Quadratmaschengewebe 20 [μm] hydrophiliert; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 22$ [$^{\circ}\text{C}$]	32
Abbildung 9: Schematischer Aufbau und Funktion des <i>OptiFil</i> Filtersystems während der Filtration	34
Abbildung 10: Schematischer Aufbau und Funktion des <i>OptiFil</i> Filtersystems während der Rückspülung	35
Abbildung 11: R&I-Schema der Pilotanlage <i>OptiFil</i> 150-180	37
Abbildung 12: Pilotanlage <i>OptiFil</i> 150	39
Abbildung 13: Einbindung der Pilotanlage in den Kläranlagenprozess	40
Abbildung 14: Druckverlaufaufzeichnung eines Versuches; Feed-, Filtrat- und Differenzdruck; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar]; $P_2 = 2$ [bar]	42
Abbildung 15: Durchfluss- und Temperaturaufzeichnung eines Versuches; Filtratstrom, Rejektstrom und Zulauftemperatur; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar]; $P_2 = 2$ [bar]	43
Abbildung 16: Druckdifferenz- und Rejektmengenverlauf von Rückspülzyklen; einfache Rückspülung; $\Delta P_{\text{fix}} = 0,6$ [bar], anfängliche Rejektmenge = 4 [L] pro Rückspülung	44
Abbildung 17: Filtermittelwiderstand über Rückspülanzahl; Ergebnisse der Filtermaterialversuchsreihen	45
Abbildung 18: Vergleich der Filtermittel aus unterschiedlichen Werkstoffen; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf	47
Abbildung 19: Anströmseite des PVDC-VersuchsfILTERGEBESES; Versuchsdauer 6,5 [h]; 822 Rückspülungen; Feststoffkonzentration Zulauf: 7,6 [mg/L]; 90 [m^3] erzeugtes Filtrat	48

Abbildung 20: Vergleich unterschiedlich aufgebauter Filtermittel; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf	49
Abbildung 21: Vergleich oberflächenbehandelter Metallgewebe; HFT: unbehandelt, HFTb: elektropoliert; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf	50
Abbildung 22: Abströmseite von Metalltressengeweben 25 [µm]; links: unbehandeltes Gewebe (HFT) nach 656 Rückspülungen; rechts: elektropoliertes Gewebe (HFTb) nach 796 Rückspülungen	50
Abbildung 23: Versuchsreihen mit Filtratrückführung verglichen mit der Standardfahrweise; Rückspülanzahl, Filtratsumme und Feststoffgehalt Filterzulauf	52
Abbildung 24: Ablagerungen auf einer ODW-Filtertresse an schlecht zu reinigenden Zonen	54
Abbildung 25: Blockfließbild der KTL-Lackieranlage	57

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fest/Flüssig-Trennverfahren – physikalische Prinzipien ^[5]	9
Tabelle 2: Einteilung der wässrigen Reiniger ^[18]	22
Tabelle 3: Gewählte Filtermaterialien für Pilotierungsversuche in der Abwasserreinigungsanlage	28
Tabelle 4: Ermittelte Filtermittelwiderstandskoeffizienten; treibende Druckdifferenz $\Delta P = 0,15$ [bar]; Filterfläche $A = 1,89$ [cm ²]	32
Tabelle 5: Richtwerte von Widerstandskoeffizienten einiger Filtermittel ^[5]	33
Tabelle 6: Ermittelte Steigungen der Rejektmengenverläufe über die Rückspülanzahl	46
Tabelle 7: Vergleich der Versuchsergebnisse - Auslösedifferenzdruck	51

6.3 Literaturverzeichnis

- [1] Richter E., Praxishandbuch Richtiger Umgang mit Abfällen; Band 1 Ausgabe 11, WEKA Media GmbH, 1999; Kapitel 3.2.4.3, ISBN 3-811185047
- [2] Zimpel J., Abwasser und Abfall der Metallindustrie; Expert Verlag; Renningen-Malmsheim, 1995, S.23ff, ISBN 3-8169-1187-0
- [3] Hartinger L., Handbuch der Abwasser- und Recyclingtechnik für die metallverarbeitende Industrie; 2. Ausgabe, Hanser Verlag, 1991, ISBN 3-446156151
- [4] Santner C., Entwicklung emissionsarmer Reinigungsprozesse für Werkstückoberflächen mit besonderer Berücksichtigung von Produktionsprozessen der Automobilzulieferindustrie, Projektbericht; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2010, S.112-113, http://www.nachhaltigwirtschaften.at/fdz_pdf/enderbericht_1054_efor.pdf (Zugriff am 06.07.2012)
- [5] Stieß M., Mechanische Verfahrenstechnik, Band 2; Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2001, ISBN 3-540-55852-7
- [6] Gasper H., Projektierung und Optimierung von Fest/Flüssig-Filtrationssystemen; Chemie Ingenieur Technik 76, 2004, S.746-750
- [7] Luckert K., Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung; Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2004, S.143ff, ISBN 3-8027-2196-9
- [8] Ripperger S., Optimierung von Rückspülfiltern für Flüssigkeiten; F&S Filtrieren und Separieren 22 Nr.2, 2008, S.68-72
- [9] Nirschl H., Stahl W., Anlauf H., Unterlagen zum 27. FFT Kurs zum Thema Fest – Flüssig – Trennung; Kurskriptum, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe, 2006, Kapitel VI.3, S.24-25
- [10] Homepage Haver &Boecker; <http://www.diedrahtweber.com/de/anwendungen-produkte/industriesiebe/drahtsiebboeden/webarten-din-iso-47833.html>, <http://www.diedrahtweber.com/de/anwendungen-produkte/minimesh-filtertressen.html>, (Zugriff am 12.07.2012)
- [11] Ripperger S., Schnitzer Ch., Die Barrierewirkung von Geweben, Teil 1; F&S Filtrieren und Separieren 19 Nr.3, 2005, S.110-117
- [12] Schubert H., Grundlagen des Agglomerierens; Chemie Ingenieur Technik 51, 1979, S.266-277
- [13] Stieß M., Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1; Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage, 2009, ISBN 978-3-540-32551-2
- [14] Roth J.E., Grundlagen Grenzflächeneffekte bei der Fest/Flüssig-Trennung; Chemie Ingenieur Technik 63, 1991, S.104-115

-
- [15] Rumpf H., Particle Adhesion. In: Sastra, K.V.S. (Hrsg.): Agglomeration, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1977, S.97-129
- [16] Bobe U., Die Reinigbarkeit technischer Oberflächen im immmergierten System; Dissertation am Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatekunde, Technische Universität München, 2008, S.26-46
- [17] Haase B., Bauteilreinigung – Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen; Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1996, ISBN 3-8169-1467-5
- [18] Pietschmann J., Industrielle Pulverbeschichtung; Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 3. Auflage, 2010, ISBN 978-3-8348-0463-1
- [19] Brunn K., Jansen R., Metallreinigung und -entfettung; Publikation der SurTec GmbH, 1997, <http://www.surtec.com/Publikationen/Entfettung.pdf>, (Erstzugriff am 08.05.2012)
- [20] Adams K.H., Oberflächenvorbehandlung; Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 1999, ISBN 3-527-29749-9
- [21] Brunn K., Modulare wässrige Reinigungssysteme – Einsatz in verschiedenen Anwendungsgebieten; Technischer Brief der SurTec GmbH, 4. Auflage, 2001, <http://www.surtec.de/TB/TB03D.pdf>, (Erstzugriff am 08.05.2012)
- [22] Nirschl H., Sommer K.; Untersuchungen zum Einfluss der Struktur von Filtermedien auf deren Reinigungsverhalten, Schlussbericht der AiF-Forschungsvereinigung, 2011
- [23] VDI 2762 Blatt 2:2010-12 Filtrierbarkeit von Suspensionen: Bestimmung des Filterkuchenwiderstands (Mechanical solid-liquid separation by cake filtration: Determination of filter cake resistance); Berlin, Beuth Verlag
- [24] DIN 38409-2, März 1987. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H2), 1987, 12 S.
- [25] RÖMPPonline, Artikel Phosphatieren; www.roempp.com (Zugriff am 31.07.2012)
- [26] RÖMPPonline, Artikel Elektrotacklackierung; www.roempp.com (Zugriff am 31.07.2012)

7 Anhang

7.1 Filtermittelwiderstandsmessungen

Tabelle 8: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel ODW; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	201,4	193,1	370,0
2	336,7	356,7	526,4
3	482,6	519,4	682,3
4	616,4	681,5	837,6
5	771,5	869,8	992,3
6	903,5	1057,0	1159,4
7	1023,9	1216,9	1287,4
8	1176,1	1376,1	1466,2
9	1294,8	1534,5	1606,1
10	1412,7	1692,1	1834,0
11	1572,2	1861,9	1985,2
12	1699,2	2004,4	2136,2
13	1825,7	2159,2	2286,7
14	1972,6	2313,0	2436,7
15	2097,7	2491,7	2573,7
16	2222,1	2644,2	2735,3
17	2345,5	2795,8	2883,8
18	2468,2	2946,7	3032,0
19	2590,2	3097,3	3192,1
20	2712,1	3234,6	3327,1
21	2833,3	3384,1	3473,9
22	2973,1	3545,3	3620,1
23	3092,2	3718,7	
24	3210,7		
25	3328,7		
26	3446,2		
27	3562,9		

Tabelle 9: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel BMT; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	113,8	235,0	149,4
2	218,6	352,2	267,2
3	323,1	451,1	384,8
4	427,3	558,4	502,0
5	531,1	720,5	619,0
6	669,0	837,1	735,8
7	772,1	917,6	930,1
8	883,3	1015,6	979,1
9	985,7	1131,2	1065,8
10	1087,8	1246,5	1200,5
11	1181,0	1343,8	1315,7
12	1282,5	1432,0	1430,8
13	1383,6	1590,3	1545,4
14	1484,0	1695,5	1669,1
15	1584,1	1800,5	1773,5
16	1684,0	1905,3	1943,8
17	1783,6	2009,8	2056,9
18	1915,8	2131,4	2169,7
19	2014,5	2235,3	2282,2
20	2113,0	2391,0	2394,4
21	2211,7	2426,1	2506,3
22	2301,9	2529,3	2627,2
23	2407,7	2632,1	2729,4
24	2505,0	2734,7	2849,8
25	2602,1	2837,0	2951,5
26	2698,9	2939,1	3062,2
27	2803,4	3041,0	3181,6
28	2899,6	3142,6	3273,3
29	2987,5	3244,0	3392,2
30	3075,1	3353,6	3501,6
31	3170,3	3513,1	3610,7
32	3280,9		
33	3375,5		

Tabelle 10: Messdaten Widerstandsmessung; Filtermittel PVDC; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 22$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]			Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3		Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	117,0	102,0	156,3	45	1922,3	1805,7	2131,9
2	154,6	140,7	204,9	46	1954,4	1842,5	2174,3
3	195,6	179,4	242,3	47	1999,2	1879,2	2216,7
4	236,6	217,9	290,8	48	2037,7	1915,9	2259,1
5	284,4	256,5	342,9	49	2076,1	1952,6	2301,4
6	325,3	314,1	383,8	50	2120,7	1989,2	2343,7
7	366,1	336,9	432,0	51	2158,9	2025,8	2386,0
8	406,8	372,1	480,3	52	2197,1	2080,5	2428,2
9	447,5	410,4	521,0	53	2235,2	2117,0	2470,4
10	488,2	448,7	565,4	54	2266,9	2153,5	2512,6
11	556,3	506,0	609,7	55	2311,3	2189,9	2554,6
12	576,6	544,1	654,0	56	2355,6	2226,3	2596,7
13	617,0	582,1	698,2	57	2393,4	2262,6	2638,7
14	657,5	620,1	764,8	58	2431,2	2298,9	2680,6
15	697,9	658,2	779,7	59	2469,1	2335,2	2722,5
16	738,2	696,3	820,2	60	2506,8	2371,4	2785,5
17	778,5	734,2	868,1	61	2544,5	2407,6	2827,4
18	825,4	772,2	912,0	62	2582,2	2443,8	2869,3
19	865,6	810,1	956,0	63	2626,1	2480,0	2911,1
20	905,7	847,9	1029,1	64	2663,6	2516,1	2952,8
21	946,0	885,7	1072,9	65	2701,1	2552,1	2994,5
22	986,0	923,4	1116,7	66	2738,6	2588,2	3036,2
23	1026,2	961,1	1160,5	67	2776,0	2624,5	3077,8
24	1066,1	998,8	1204,1	68	2813,4	2660,3	3119,3
25	1106,0	1036,4	1247,8	69	2857,0	2696,2	3160,8
26	1145,7	1074,0	1291,4	70	2894,3	2732,0	3202,3
27	1198,7	1111,5	1331,3	71	2956,8	2767,7	3243,7
28	1238,3	1149,0	1378,4	72	2969,2	2803,4	3285,1
29	1277,9	1186,4	1421,8	73	3006,3	2839,1	3326,4
30	1317,4	1223,9	1465,2	74	3049,7	2880,7	3367,7
31	1350,3	1286,2	1508,5	75	3086,6	2916,4	3409,1
32	1396,2	1323,6	1548,2	76	3123,7	2952,0	3450,6
33	1435,6	1360,9	1595,1	77	3160,6	3005,3	3491,7
34	1474,9	1398,2	1638,2	78	3197,5	3040,9	3539,7
35	1520,7	1435,4	1681,4	79	3234,3	3076,4	
36	1559,8	1491,4	1724,5	80	3277,2	3111,9	
37	1598,9	1503,9	1767,6	81	3313,9	3147,3	
38	1637,8	1540,9	1810,6	82	3350,6	3182,7	
39	1670,3	1578,0	1857,2	83	3387,2	3218,1	
40	1722,2	1615,0	1896,5	84	3423,7	3253,6	
41	1780,7	1652,0	1939,3	85	3460,2	3289,0	
42	1800,0	1688,9	1982,1	86		3324,2	
43	1838,7	1732,0	2046,2	87		3359,5	
44	1877,3	1768,8	2117,9	88		3394,4	

Tabelle 11: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel QM15; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	321,6	201,0	198,8
2	432,6	300,3	315,8
3	534,0	399,1	423,4
4	653,4	497,6	521,8
5	763,1	595,6	628,9
6	872,5	717,7	744,7
7	981,4	806,8	842,4
8	1089,9	903,6	948,8
9	1198,0	999,9	1055,0
10	1305,5	1096,0	1196,1
11	1412,5	1191,8	1372,7
12	1519,2	1302,8	1407,9
13	1625,4	1405,5	1512,7
14	1731,2	1492,0	1617,6
15	1836,5	1593,7	1722,1
16	1941,2	1679,5	1826,5
17	2097,6	1835,2	1939,3
18	2159,0	1874,3	2043,1
19	2262,4	1959,1	2138,1
20	2356,8	2066,6	2241,4
21	2502,1	2158,5	2353,0
22	2621,1	2249,9	2481,2
23	2714,2	2341,1	2575,0
24	2815,5	2439,4	2694,0
25	2924,8	2522,2	2812,5
26	3017,0	2612,3	2888,5
27	3117,1	2702,0	2989,7
28	3216,8	2806,3	3107,3
29	3316,1	2902,9	3207,8
30		2991,6	3316,3
31		3072,6	3407,9
32		3160,6	
33		3270,1	
34		3350,1	
35		3437,1	
36		3531,1	

Tabelle 12: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel PRD; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	168,8	180,2	183,0
2	264,1	270,6	330,6
3	359,0	368,1	408,0
4	461,3	457,7	500,7
5	547,5	554,5	600,8
6	641,1	643,3	692,9
7	742,0	732,0	784,7
8	897,1	820,3	876,3
9	920,2	923,1	967,7
10	1012,1	996,4	1058,7
11	1164,4	1098,8	1157,0
12	1255,2	1193,6	1240,1
13	1345,5	1273,6	1330,4
14	1442,9	1368,9	1420,4
15	1524,9	1448,4	1517,9
16	1606,6	1549,3	1600,1
17	1710,0	1635,5	1697,0
18	1798,4	1721,5	1778,7
19	1871,7	1821,3	1860,2
20	1966,7	1906,7	1963,5
21	2054,0	1984,6	2044,7
22	2140,8	2076,5	2133,5
23	2227,2	2168,2	2265,1
24	2313,2	2245,6	2359,9
25	2398,9	2343,8	2447,3
26	2484,3	2427,8	2527,1
27	2569,2	2511,5	2613,9
28	2653,9	2595,0	2707,7
29	2737,9	2678,4	2786,9
30	2828,7	2761,5	2865,9
31	2905,2	2844,4	2959,0
32	2988,2	2927,2	3051,8
33	3071,0	3023,5	3123,0
34	3153,3	3112,6	3214,9
35	3228,7	3187,7	3299,9
36	3377,4	3262,7	3384,5
37		3371,4	3468,9
38			3553,2

Tabelle 13: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel HFTb; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 20$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	275,7	280,1	255,8
2	465,8	440,7	435,6
3	642,2	614,8	618,4
4	791,5	762,0	756,5
5	954,3	935,9	932,8
6	1103,4	1083,1	1079,9
7	1279,4	1243,6	1236,2
8	1468,6	1403,9	1390,6
9	1630,7	1564,0	1560,6
10	1792,5	1723,8	1721,1
11	1954,1	1883,4	1882,4
12	2115,5	2056,0	2054,5
13	2290,0	2201,9	2200,0
14	2437,9	2426,7	2351,7
15	2626,0	2598,3	2542,0
16	2786,1	2756,2	2703,3
17	2946,0	2913,9	2877,6
18	3105,7	3150,0	3149,2
19	3264,9	3203,4	3282,9
20		3360,3	3412,3

Tabelle 14: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel HFT; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	320,1	378,0	168,6
2	498,4	555,7	349,7
3	676,1	732,8	516,3
4	838,3	894,5	710,0
5	1029,2	1085,1	889,2
6	1204,6	1260,4	1040,2
7	1379,4	1435,2	1218,2
8	1553,6	1609,4	1368,3
9	1727,1	1783,1	1531,6
10	1899,7	1956,4	1694,4
11	2071,8	2114,6	1856,6
12	2243,2	2301,1	2018,4
13	2528,9	2472,8	2193,0
14	2572,0	2644,1	2407,0
15	2755,8	2815,0	2553,7
16	3009,2	3100,3	2713,2
17	3177,8	3143,1	2885,6
18	3345,5	3326,4	3110,9
19			3191,0
20			3348,9

Tabelle 15: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel QM20; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 20$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	289,9	250,1	237,3
2	437,5	405,6	389,6
3	584,7	560,7	541,6
4	731,4	715,1	693,0
5	877,7	945,7	843,8
6	1023,4	1099,1	994,0
7	1168,7	1251,9	1143,8
8	1313,6	1404,4	1293,2
9	1458,0	1581,7	1442,1
10	1602,0	1733,2	1590,5
11	1745,6	1884,2	1738,4
12	1984,8	2034,8	1885,8
13	2032,9	2184,9	2131,4
14	2175,2	2334,6	2180,7
15	2317,1	2483,8	2326,7
16	2458,5	2632,6	2544,5
17	2670,0	2781,0	2689,3
18	2810,5	2928,9	2833,8
19	2950,6	3076,3	2977,7
20	3090,3	3223,3	3121,5
21	3229,7		3264,9
22	3368,7		3407,6
23	3507,3		

Tabelle 16: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel QM20b; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 22$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	162,5	209,7	324,8
2	317,8	360,0	488,2
3	472,5	509,6	651,1
4	626,7	658,6	813,4
5	780,3	806,9	975,3
6	933,4	1028,7	1163,4
7	1085,9	1176,0	1324,2
8	1250,5	1322,7	1484,6
9	1389,2	1468,9	1644,4
10	1540,0	1614,7	1803,8
11	1702,8	1760,1	1962,7
12	1852,4	1905,1	2200,8
13	2001,8	2049,6	2280,6
14	2150,3	2193,6	2438,1
15	2286,9	2337,1	2595,0
16	2435,5	2480,2	2751,5
17	2594,9	2622,8	2907,5
18	2717,1	2764,9	3140,6
19	2912,0	3001,7	3295,4
20	3045,2	3049,3	3449,8
21	3177,9	3190,0	
22	3334,2	3330,4	
23		3539,6	

Tabelle 17: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel QM15b; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 22$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	109,2	192,4	145,8
2	179,2	264,5	225,9
3	249,0	330,5	305,8
4	318,6	402,4	385,5
5	388,0	468,4	465,0
6	457,1	546,2	584,5
7	526,0	612,0	611,2
8	629,1	689,6	690,2
9	652,2	761,1	769,2
10	714,7	832,4	900,3
11	822,4	903,6	978,8
12	895,7	974,6	1057,1
13	957,6	1045,5	1135,1
14	1024,9	1116,2	1219,4
15	1092,0	1227,8	1297,3
16	1164,4	1252,0	1368,4
17	1231,1	1328,1	1445,8
18	1291,9	1398,2	1523,1
19	1358,1	1462,3	1600,2
20	1424,0	1537,8	1677,1
21	1489,8	1642,0	1760,1
22	1555,3	1711,2	1830,2
23	1620,7	1780,4	1906,4
24	1685,9	1849,3	1982,4
25	1750,8	1918,1	2058,2
26	1815,6	1986,7	2133,7
27	1880,1	2060,9	2209,1
28	1944,4	2123,5	2271,7
29	2008,5	2191,6	2396,5
30	2072,4	2259,7	2464,8
31	2178,3	2327,5	2545,4
32	2241,6	2395,3	2619,5
33	2305,1	2462,9	2693,5
34	2367,8	2530,4	2767,2
35	2430,1	2597,7	2840,4
36	2492,2	2664,8	2950,1
37	2554,1	2731,8	2974,8
38	2647,0	2798,6	3047,7
39	2667,9	2865,2	3120,2
40	2729,3	2931,7	3192,7
41	2790,6	2998,1	3265,0
42	2851,7	3108,4	3337,2
43	2912,5	3179,9	3409,3
44	2972,9	3240,3	3481,2
45	3033,2	3339,2	
46	3093,4	3361,4	
47	3153,3	3421,4	
48	3213,1	3492,2	
49	3312,4	3557,4	

Tabelle 18: Messdaten Widerstandsmessung;
Filtermittel LB; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	165,6	131,8	
2	216,3	179,7	
3	266,9	251,4	
4	317,3	299,1	
5	375,7	346,7	
6	425,8	394,2	
7	476,0	441,7	
8	525,9	489,0	
9	575,8	536,4	
10	625,5	583,6	
11	707,8	630,8	
12	733,2	709,1	
13	782,6	725,4	
14	831,7	772,4	
15	880,9	819,3	
16	929,9	866,1	
17	986,9	912,9	
18	1035,6	959,6	
19	1084,2	1006,2	
20	1132,7	1076,0	
21	1181,2	1122,6	
22	1229,4	1169,0	
23	1285,7	1215,4	
24	1333,7	1261,7	
25	1381,6	1307,9	
26	1429,4	1354,0	
27	1477,1	1400,0	
28	1524,7	1446,0	
29	1572,1	1491,9	
30	1627,3	1537,7	
31	1674,5	1583,5	
32	1721,7	1629,2	
33	1768,6	1674,9	
34	1815,5	1720,4	
35	1862,2	1765,9	
36	1916,5	1811,3	
37	1962,9	1856,7	
38	2009,2	1901,9	
39	2055,4	1969,6	
40	2101,5	2014,6	
41	2178,5	2059,6	
42	2193,8	2134,6	
43	2247,2	2149,8	
44	2292,8	2194,7	
45	2338,5	2239,5	
46	2384,0	2284,2	
47	2429,4	2328,7	
48	2474,9	2373,3	
49	2527,7	2417,8	
50	2572,9	2462,2	
51	2618,0	2506,6	
52	2663,0	2550,9	
53	2707,9	2595,1	
54	2752,7	2639,3	
55	2805,0	2683,5	
56	2849,6	2749,6	
57	2894,2	2793,6	
58	2938,6	2837,6	
59	2983,0	2881,5	
60	3027,2	2925,3	
61	3078,7	2969,2	
62	3122,8	3012,9	
63	3166,8	3056,5	
64	3210,9	3100,2	

Nur zwei
Proben
vorhanden

Tabelle 19: Messdaten Widerstandsmessung; Filtermittel PVDF; $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]			Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3		Messung 1	Messung 2	Messung 3
1	84,8	91,1	91,7	68	1641,5	1477,2	1535,5
2	108,1	112,1	113,4	69	1663,3	1496,6	1555,8
3	131,4	133,0	135,1	70	1688,1	1516,1	1586,1
4	154,6	154,0	156,8	71	1710,9	1535,6	1596,4
5	177,7	174,8	178,4	72	1732,8	1555,0	1616,7
6	200,9	195,7	200,0	73	1754,6	1574,5	1636,9
7	224,0	227,5	225,3	74	1776,3	1593,9	1657,0
8	247,1	234,1	246,9	75	1794,5	1613,3	1680,5
9	270,1	254,7	282,7	76	1819,7	1632,8	1700,7
10	292,8	275,4	290,2	77	1841,4	1652,2	1720,8
11	316,4	296,1	311,7	78	1863,2	1671,6	1740,9
12	339,4	327,1	333,1	79	1884,8	1690,9	1764,3
13	362,4	347,7	358,2	80	1906,5	1710,3	1784,5
14	396,8	368,2	379,6	81	1928,2	1739,3	1804,5
15	419,8	388,8	401,0	82	1949,8	1758,6	1824,7
16	442,7	409,3	422,4	83	1971,4	1777,9	1844,8
17	465,5	429,9	447,3	84	1993,1	1797,1	1864,9
18	488,4	450,4	468,6	85	2014,8	1816,3	1884,9
19	511,2	470,9	489,9	86	2036,5	1835,6	1908,3
20	534,0	491,3	511,2	87	2058,1	1854,9	1928,3
21	556,8	511,8	532,4	88	2079,7	1874,1	1948,3
22	579,6	532,2	553,6	89	2101,2	1893,2	1968,3
23	602,4	552,7	574,9	90	2122,8	1912,4	1988,3
24	625,2	573,1	596,1	91	2144,4	1931,6	2008,2
25	647,8	593,5	620,8	92	2176,7	1950,8	2031,5
26	670,6	613,9	641,9	93	2198,2	1970,0	2051,4
27	693,3	641,0	663,0	94	2219,7	1989,2	2071,2
28	715,9	661,3	684,2	95	2241,1	2014,7	2091,2
29	738,6	681,6	708,7	96	2262,6	2033,8	2111,0
30	772,5	701,8	729,8	97	2284,0	2052,9	2130,9
31	795,1	722,1	750,8	98	2305,4	2075,7	2154,0
32	817,7	742,3	771,8	99	2326,8	2094,5	2173,8
33	840,2	762,5	792,8	100	2361,8	2113,5	2207,0
34	862,8	782,6	813,7	101	2369,7	2132,6	2213,5
35	885,3	802,7	834,6	102	2391,1	2148,4	2233,2
36	907,9	822,8	859,0	103	2412,5	2170,6	2253,0
37	930,5	842,9	879,9	104	2433,8	2189,6	2272,7
38	953,1	862,3	900,8	105	2455,1	2208,6	2295,6
39	975,6	883,3	921,7	106	2476,4	2227,5	2315,3
40	998,9	903,3	943,1	107	2497,8	2246,4	2335,0
41	1020,6	923,4	963,5	108	2519,1	2265,4	2354,6
42	1043,1	943,3	987,8	109	2540,4	2284,3	2377,5
43	1065,5	973,3	1008,6	110	2572,2	2303,2	2397,2
44	1087,9	993,3	1029,4	111	2593,5	2322,0	2416,8
45	1110,3	1013,2	1050,1	112	2614,8	2340,9	2436,4
46	1132,6	1033,2	1070,8	113	2636,0	2366,0	2455,9
47	1154,9	1053,1	1091,5	114	2657,2	2384,8	2475,5
48	1188,3	1073,0	1112,1	115	2678,4	2403,6	2495,0
49	1210,6	1092,9	1132,7	116	2699,6	2422,3	2514,5
50	1232,9	1112,8	1156,8	117	2720,7	2441,1	2537,3
51	1255,1	1132,7	1177,4	118	2741,9	2459,9	2556,8
52	1277,3	1152,4	1198,0	119	2763,1	2478,6	2576,2
53	1299,5	1172,3	1218,6	120	2784,1	2497,4	2599,0
54	1321,7	1192,0	1242,5	121	2805,2	2516,1	2618,4
55	1343,8	1211,8	1263,0	122	2826,4	2534,8	2637,9
56	1365,9	1231,5	1283,5	123	2847,5	2553,5	2657,3
57	1388,0	1251,2	1304,1	124	2868,5	2572,2	2676,7
58	1410,2	1270,9	1324,6	125	2889,6	2590,8	2696,2
59	1432,3	1290,6	1345,1	126	2910,7	2609,4	2715,7
60	1454,4	1320,1	1365,6	127	2931,7	2628,0	2735,1
61	1476,5	1339,7	1389,5	128	2952,8	2660,6	2757,7
62	1498,5	1359,3	1409,9	129	2973,9	2668,5	2777,1
63	1520,6	1378,9	1430,3	130	3020,5	2687,1	2796,4
64	1542,7	1398,5	1450,7	131	3026,9	2705,7	2815,9
65	1564,6	1418,1	1471,1	132	3047,8	2730,4	2835,3
66	1586,6	1437,7	1494,8	133	3068,9	2748,9	2854,6
67	1608,6	1457,3	1515,2	134	3089,9	2767,4	2874,0

Tabelle 20: Messdaten Widerstandsmessung
(Fortsetzung); Filtermittel PVDF;
 $\Delta P = 0,15$ [bar]; $T = 19,5$ [°C]

Zeit [s]	Volumen [ml]		
	Messung 1	Messung 2	Messung 3
135	3110,9	2786,0	2896,5
136	3131,9	2804,5	2915,8
137	3152,9	2823,0	2935,1
138	3173,9	2841,5	2954,4
139	3194,8	2860,0	2973,7
140	3215,7	2878,6	2996,1
141	3236,6	2897,0	3015,4
142	3257,6	2915,5	3034,6
143	3278,4	2933,9	3053,7
144	3299,3	2952,4	3073,0
145	3320,3	2970,8	3092,1
146	3341,1	2998,5	3114,4
147	3362,0	3016,9	3133,6
148	3382,8	3035,3	3152,8
149	3407,1	3053,7	3171,9
150	3427,9	3072,1	3191,0
151	3448,7	3090,4	3210,1
152	3479,9	3108,8	3229,2
153	3500,7	3127,1	3248,3
154	3521,4	3145,4	3270,6
155	3542,2	3163,7	3289,7
156	3563,1	3182,0	3308,7
157	3583,9	3200,3	3327,8
158	3604,6	3228,3	3350,0
159	3625,3	3237,0	3369,1
160	3646,0	3255,4	3388,1
161	3669,3	3273,6	3407,9
162	3691,2	3291,8	3426,3
163	3711,8	3310,0	3445,2
164	3732,5	3334,4	3464,2
165	3753,2	3352,6	3483,2
166	3773,8	3370,8	3502,1
167	3794,4	3392,0	3524,2
168	3815,0	3410,2	3543,1
169	3835,6	3428,4	3562,1
170	3856,1	3446,5	3581,0
171	3876,1	3464,7	3603,1
172		3482,8	3622,0
173		3501,0	3640,6
174		3519,1	3658,6
175		3537,3	
176		3555,4	
177		3573,1	

7.2 Standzeitversuche Filtermaterial und Fahrweise

Tabelle 21: Analysenergebnisse abfiltrierbare Stoffe

Nr.	Filtermittel	Fahrweise	Feststoffgehalt Zulauf [mg/L]	Feststoffgehalt Filtrat [mg/L]
1	ODW	einfache RSP	5,2	2,0
2	ODW	einfache RSP	9,6	3,6
3	BMT	einfache RSP	7,6	7,0
4	PRD	einfache RSP	1,2	0,8
5	PVDC	einfache RSP	7,6	4,0
6	PVDF	einfache RSP	8,4	7,2
7	QM15	einfache RSP	10,4	4,0
8	QM15b	einfache RSP	-	-
9	LB	einfache RSP	7,2	3,4
10	QM20	einfache RSP	4,2	1,0
11	QM20b	einfache RSP	5,6	2,4
12	HFT	einfache RSP	2,8	1,6
13	HFTb	einfache RSP	6,4	-
14	HFT	einfache RSP	4,8	0,4
15	HFTb	einfache RSP	1,6	0,8
16	V301	einfache RSP	4,0	0,8
17	ODW	einfache RSP	11,2	3,6
18	ODW	Filtratrückführung	4,8	3,2
19	ODW	Filtratrückführung	0,8	-
20	ODW	Filtratrückführung	0,8	0,4
21	ODW	Blasenspeicher	7,3	3,3
22	ODW	einfache RSP	2,0	1,6
23	QM15	Blasenspeicher	3,6	0,0

Tabelle 22: Ergebnisse der Filtermittelversuchsreihen

Nr.	Filtermittel	Fahrweise	Dauer [h]	RSP-Anzahl	Filtratsumme [m ³]	Filterleistung [m ³ /m ² h]	Rejektmengensteigerung x 1000	Bemerkungen
1	ODW	einfache RSP	1,9	254	27,7	372,2	-5,95	
2	ODW	einfache RSP	2,9	200	33,2	302,0	-8,03	
3	BMT	einfache RSP	28,2	2959	400,7	372,0	-0,78	nicht verblockt
4	PRD	einfache RSP	3,0	667	40,0	354,2	-2,7	
5	PVDC	einfache RSP	6,5	822	90,2	361,9	-0,99	nicht verblockt
6	PVDF	einfache RSP	6,2	768	85,8	362,1	-1,04	nicht verblockt
7	QM15	einfache RSP	9,5	1567	97,4	267,2	-1,33	
8	QM15b	einfache RSP	4,7	1013	46,3	257,6	-1,66	
9	LB	einfache RSP	22,7	3750	100,7	116,2	-0,19	nicht verblockt
10	QM20	einfache RSP	33,8	3954	344,0	266,4	-0,41	nicht verblockt
11	QM20b	einfache RSP	20,3	3608	199,9	257,3	-0,70	nicht verblockt
12	HFT	einfache RSP	20,3	2026	235,8	303,4	-0,62	
13	HFTb	einfache RSP	9,8	796	114,1	306,3	-2,03	
14	HFT	einfache RSP	13,6	656	139,6	268,9	-2,32	
15	HFTb	einfache RSP	36,2	3250	361,8	261,4	-0,32	nicht verblockt
16	V301	einfache RSP	3,1	166	36,0	307,2	-9,65	

Tabelle 23: Ergebnisse der Fahrweisenversuchsreihen

Nr.	Filtermittel	Fahrweise	Dauer [h]	RSP-Anzahl	Filtratsumme [m ³]	Filterleistung [m ³ /m ² h]	Rejektmengensteigerung x 1000	Bemerkungen
17	ODW	einfache RSP	3,4	297	40,2	312,1	-5,03	$\Delta P_{\text{fix}} = 0,3$ [bar]
18	ODW	Filtratrückführung	12,3	687	89,5	190,9	-3,82	75 l Rückführung
19	ODW	Filtratrückführung	1,8	95	17,1	246,7	-23,18	150 l Rückführung
20	ODW	Filtratrückführung	5,3	185	39,3	195,4	-13,19	100 l Rückführung
21	ODW	Blasenspeicher	14,7	708	157,8	281,1	-0,92	
22	ODW	einfache RSP	7,9	725	66,6	219,5	-2,36	$P_2 = 3,8$ [bar]
23	QM15	Blasenspeicher	2,9	218	28,2	253,4	-4,37	

7.3 Standzeitversuche im Spülbadprozess

Tabelle 24: Erstparametrierung *OptiFil* Rückspülfilter im Bäderprozess der Automobilindustrie

Parameter	Einstellwert
Filterbetriebsart	Delta P Fix
Delta P Fix	0,6 [bar]
Delta P Limit	3,5 [bar]
Delta P Max	4,0 [bar]
Motordrehzahl	60 [%]
Rückspültimer	Deaktiviert
Max. Rückspülzeit	30 [s]
Rückspülverzögerung	40 [s]
Start Dauer-RSP	3,5 [bar]
Ende Dauer-RSP	3,4 [bar]