



REINIGUNGSFÄHIGKEIT VON FILTERMEDIEN MITHILFE KONTINUIERLICHER UND PULSIERENDER STRÖMUNG

Caroline Weidemann



Caroline Weidemann

REINIGUNGSFÄHIGKEIT VON FILTERMEDIEN
MITHILFE KONTINUIERLICHER UND PULSIERENDER
STRÖMUNG

Reinigungsfähigkeit von Filtermedien mithilfe kontinuierlicher und pulsierender Strömung

von
Caroline Weidemann

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Fakultät für Chemieingenieurwesen und
Verfahrenstechnik, 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 07. November 2014
Referenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Nirschl
Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISBN 978-3-7315-0322-4
DOI 10.5445/KSP/1000044959

Reinigungsfähigkeit von Filtermedien mithilfe kontinuierlicher und pulsierender Strömung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des Karlsruher
Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Caroline Ulrike Weidemann

aus Odenheim

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Nirschl

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer

Tag der mündlichen Prüfung: 7.11.2014

Für meine Familie

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), ehemals Universität Karlsruhe (TH), in den Jahren 2009 bis 2014.

Ein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ing. habil. Hermann Nirschl, der mir die Möglichkeit gab an seinem Institut zu promovieren. Bedanken möchte ich mich nicht nur für die fachlichen Diskussionen und Anregungen, sondern auch für die angenehme Arbeitsatmosphäre, für die Aufmunterungen nach Tiefschlägen und die Möglichkeit die Ergebnisse auf vielen nationalen und internationalen Konferenzen zu präsentieren.

Herrn Prof. Dr. Ing Karl Sommer danke ich nicht nur für die freundliche Übernahme des Korreferats, sondern auch für das Interesse an meiner Arbeit und seine Anregungen während des AiF-Forschungsprojektes „Untersuchungen zum Einfluss der Struktur von Filtermedien auf deren Reinigungsverhalten“.

Ferner richtet sich mein Dank an meine ehemaligen Studenten, die durch zahlreiche Studien-, Diplomarbeiten und als Hilfwissenschaftler zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: A. Barilla, Dipl. Ing. G. Westhoff, Dipl. Ing. D. Kadau, Dipl. Ing. L. Hippen, Dipl. Ing. C. Betz, Dipl. Ing. J. Krauss, Dipl. Ing. D. Liebich, Dipl. Ing. M. Karner, Dipl. Ing. S. Vogt, Dipl. Ing. N. Barkholz und Dipl. Ing. P. Mook.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am MVM danke ich für die wunderbare Arbeitsatmosphäre in der Arbeitsgruppe. Nicht nur die fachlichen Diskussionen in den Seminaren, sondern auch die gesellschaftlichen Aktivitäten wie Grillabende und Wanderseminare haben die Zeit am MVM sehr schön gestaltet.

Keine experimentelle Arbeit kann ohne eine Laboranlage durchgeführt werden. Für den Aufbau der Anlagen waren natürlich viele Konstruktionszeichnungen notwendig, die von Hans Guigas angefertigt wurden. Lieber Hans, danke für die

Danksagung

nette Zusammenarbeit in den letzten 5 Jahren! Ebenso gilt mein Dank Thomas Reutter, Andreas Lumppe und Friedhelm Flügel. Sie waren immer zur Stelle, wenn dringend ein Bauteil benötigt wurde oder Veränderungen an demselben vorgenommen werden mussten.

Ein besonderes Dankeschön geht in diesem Zusammenhang auch an die gesamte Mechanische Werkstatt (stellvertretend dafür Olaf Jörg), die Elektrische Werkstatt und die Partikelmesstechnik.

Meinen Eltern danke ich für die jahrelange finanzielle Unterstützung während meines Studiums und dafür, dass sie ausnahmslos immer da waren, wenn man sie brauchte.

Zu guter Letzt danke ich meinem lieben Mann Roman, der mir in den letzten Wochen den Rücken frei gehalten hat und mich auch bei Tiefschlägen immer wieder motiviert hat weiterzumachen. Es ist schön, dass es dich gibt!

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Reinigung in der Fest-Flüssig-Trennung im Bereich der Filtration. Bei Filtrationsanlagen ist das am Schwersten zu reinigende Bauteil das Filtermedium. Aufgrund seiner Struktur weist es undurchlässige und durchlässige Stellen auf, die teilweise zu Strömungsschatten führen. Stellen, die von der Strömung bzw. von dem Reinigungsmedium nicht erreicht werden, sind demnach schwierig zu reinigen. Für Filtermedien gibt es bisher keine Gestaltungshinweise und Richtlinien der EHEDG (European Hygienic Design Group), da die Reinigung derselben unzureichend untersucht ist. Diese Arbeit widmet sich deshalb der Untersuchung der Mechanismen bei der Reinigung von Filtermedien.

Um die Reinigungsfähigkeit von Filtermedien unterschiedlicher Geometrie bzw. Webart vergleichen und qualifizieren zu können, ist es notwendig, das System mit dimensionslosen Kennzahlen zu beschreiben, die die jeweiligen Einflussfaktoren beinhalten. Unter Kenntnis des Zusammenspiels der jeweiligen Größen auf die Reinigungsfähigkeit, kann eine Kennzahl in Abhängigkeit der anderen das System beschreiben, was letztendlich eine Vorhersage der Reinigungsfähigkeit widerspiegelt. Dafür ist es im Vorfeld jedoch notwendig, die genauen Einflussfaktoren und deren Wirkung auf die Reinigungsfähigkeit herauszufinden. Deshalb erfolgen im Rahmen dieser Arbeit Parameterstudien zur Reinigung mithilfe kontinuierlicher und pulsierender Strömung. Dabei kommen für die kontinuierliche Reinigung eine lösliche und eine partikuläre Verunreinigung zum Einsatz und für die pulsierende Reinigung werden die Versuche nur mit einer partikulären Verunreinigung durchgeführt.

Zunächst erfolgen Untersuchungen zur Reinigung einer löslichen Verunreinigung von Filtermedien mithilfe kontinuierlicher Strömung. Bei der löslichen Verunreinigung ergeben die Reinigungsuntersuchungen einen charakteristischen

Reinigungsverlauf vergleichbar dem bei der Reinigung von Oberflächen. Die Reinigungskinetik von Filtermedien weist dabei vier charakteristische Phasen auf. Da die Verunreinigung (Riboflavin bzw. Malzextrakt) nach der Kontamination als Kuchen bzw. homogene Schicht auf der Filteroberfläche vorliegt, beschreibt Phase 1 den Kuchenabwurf durch die Strömung. Zurück bleiben nur einzelne Kuchenbruchstücke, die in Phase 2, dem Flockenaustrag, ausgetragen werden. Der zurückbleibende homogene Film an löslicher Verunreinigung ist nun homogen um die Filterfasern verteilt und wird in Phase 3 konstant ausgetragen. In dieser Phase wird auch der experimentelle Stoffübergangskoeffizient bestimmt. Nach Abtrag des homogenen Films bleiben nur noch einzelne Reste an gelöstem Riboflavin in den Strömungsschatten und in den Rauheitstiefen der Oberfläche zurück. Diese werden in der letzten Phase, der diffusionskontrollierten 4. Phase, ausgetragen. Des Weiteren erfolgen Reinigungsversuche von Geweben unterschiedlicher Webart, unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit. Die Kenntnis der Einflussfaktoren ermöglichte die Erarbeitung dimensionsloser Kennzahlen und mithilfe der experimentellen Daten konnte der Zusammenhang dieser Kennzahlen untereinander dargestellt werden. Somit ist es damit möglich, das Reinigungsergebnis theoretisch unter Kenntnis der Gewebegeometrie (Dicke, Webart, etc.), der Strömungsgeschwindigkeit und der diffusiven Eigenschaften der löslichen Verunreinigung vorherzusagen.

Für die partikuläre Verunreinigung gelang bei der kontinuierlichen Strömung ebenfalls eine dimensionslose Betrachtung. Neben der aus der Literatur bekannten Reynolds-Zahl wurden neue Kennzahlen bestimmt, die den Einfluss der Partikelgröße und die Gewebegeometrie berücksichtigen. Mithilfe der experimentellen Ergebnisse konnte dann ein Zusammenhang zwischen Gewebegeometrie, Anströmgeschwindigkeit, Größe der partikulären Verunreinigung und Reinigungsfähigkeit erarbeitet. Da jedoch die Ergebnisse der kontinuierlichen Reinigung kein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis liefern (es kann bei üblichen Strömungsgeschwindigkeiten nur maximal 80 % der Partikel abgereinigt werden), muss nach neuen Verfahren Ausschau gehalten werden. Deshalb liegt ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit auf der pulsierenden Reinigung von Filtermedien. Die Versuche erfolgen mithilfe einer selbst entwickelten Technikanlage. Dabei wird die pulsierende Strömung über eine Düse, die direkt vor dem Filtermedium platziert ist, erzeugt. Wichtige Parameter sind hierbei die Strömungsgeschwindigkeit des Pulses, die Pulspause, die Dauer eines Pulses, die Partikelgröße der Verunreinigung und die Geometrie des zu reinigenden Gewebes. Auch hier kann eine Dimensionsanalyse durchgeführt werden mit

deren Hilfe Kennzahlen erarbeitet werden konnten, die den Einfluss der Geometrie, der Strömung, der Partikelgröße und der Pausenzeit eines Pulses beinhalteten. Auch hier war es möglich mithilfe experimenteller Ergebnisse den Zusammenhang der Kennzahl untereinander zu bestimmen. Damit ist es möglich, die Reinigungsfähigkeit unter Kenntnis der Geometrieparameter des Gewebes und der Eigenschaften der pulsierenden Strömung (Pulspause, Pulsströmungsgeschwindigkeit) vorauszusagen. Sowohl bei der kontinuierlichen als auch bei der pulsierenden Reinigung der Gewebe ist ein Einfluss der Prozesszeit auf die Reinigungsfähigkeit zu erkennen. So steigt der Anteil der durch die Strömung erfolgreich abgereinigten Partikel mit der Durchströmungsdauer zunächst an und nähert sich erst nach einiger Zeit einem konstanten Wert. Dies kann durch unterschiedliche Ablösemechanismen je nach Partikelposition erklärt werden. Ablösemechanismen sind beispielsweise Rollen, Gleiten oder die direkte Partikelablösung normal zum Kontaktradius. Bei Partikeln, die nicht sofort abgereinigt werden, sondern erst noch über die Oberfläche rollen oder gleiten, kommt es schließlich nach ausreichend langer Strömungsdauer zu einem Partikelabtrag. Im Rahmen dieser Arbeit konnten die Mechanismen der Partikelablösung unter Strömungseinfluss untersucht werden. Es konnten neben den kritischen Reinigungsstellen des Gewebes auch Positionsänderungen erkannt und in Abhängigkeit der Filtergeometrie analysiert werden. Es hat sich gezeigt, dass die kritischen Stellen der Gewebe sich an der höchsten Stelle des Schussfadens befinden und es konnte ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Reinigungsgrad des jeweiligen Bereiches und der Partikelbewegung innerhalb dieses Bereiches aufgezeigt werden.

Summary

This thesis deals with cleaning for solid-liquid separation in the area of filtration. In filtration systems, the most difficult component to be cleaned is the filter medium. Due to its structure, it has impermeable and permeable areas, which may result in flow shades. Filters, which are not reached by the flow of the cleaning medium are difficult to clean. Unfortunately, no design suggestions and guidelines have been issued so far by the EHEDG (European Hygienic Design Group) for filter media, as their cleaning have not yet been investigated sufficiently. This thesis is aimed at determining the mechanisms involved in the cleaning of filter media.

In order to compare and qualify the cleanability of filter media of different geometries or weaves, dimensionless operation parameters are required. Knowing the effect of such operation parameters on cleanability, dependence of these parameters on each other can be analyzed, which ultimately results in a prediction of cleanability. Hence, the exact parameters and their effect on cleanability have to be determined in advance. This thesis reports parametric studies for the cleaning of filter media using continuous and pulsed flows. For continuous cleaning, a soluble and a particulate contamination are used. For the pulsed cleaning experiments, a particulate contamination only is applied.

In case of soluble impurities, cleaning tests show a characteristic curve that is similar to that of the cleaning of surfaces. When cleaning filter media, four characteristic phases can be distinguished. Since the impurity (riboflavin or malt extract) after contamination forms a cake or homogeneous layer on the filter surface, phase 1 covers cake discharge by the flow. Only individual cake fragments remain on the filter, which are discharged in phase 2, flock discharge. The remaining homogeneous film of soluble impurity is distributed homogeneously around the filter fibers and constantly released in phase 3. In this phase,

the experimental mass transfer coefficient is determined. After removal of the homogeneous film, only single residues of dissolved riboflavin in the flow shadow and in rough structures remain on the surface. These residues are discharged in the last phase, the diffusion-controlled phase 4. Cleaning tests are performed using filter fabrics of different weave and surface texture at different flow rates. The results reveal the relationship necessary for performing dimensional analysis, which provides a qualitative indication of the cleaning result. Furthermore, it is possible to theoretically predict the experimental data based on knowledge of the filter geometry (thickness, weave, etc.), flow velocity, and diffusive properties of the soluble impurity.

The non-dimensional approach also is successfully applied to particulate contamination with continuous flow. A relationship is determined among filter geometry, flow velocity, size of the particulate contamination, and cleaning capacity. In addition to the Reynolds number known from literature, new operational numbers have been derived, which take the influence of the particle size and the filter geometry into account. However, since the results of continuous cleaning are not satisfactory (only 80 per cent of particles are detached from the filter), new procedures are needed. Consequently, the work reported here also focuses on the cleaning of filter media with pulsed flow. The experiments are carried out using a self-developed pilot plant. Pulsed flow is generated by a nozzle located in front of the filter medium. Important parameters are the flow velocity of the pulse, pulse pause, duration of a pulse, particle size of the impurity to be removed, and the geometry of the filter medium. Again, a dimensional analysis is performed to elucidate the parameters and their dependence on each other. With this relationship, it is possible to predict cleanability when knowing the geometry parameters of the filter medium and the characteristics of the pulsed flow (pulse pause, pulsed flow velocity).

The studies of continuous and pulsed flows show that the detachment of particulate impurities from filter media is influenced by time. The fraction of particles successfully removed by the flow initially increases with the period of exposure to the flow. After some time, the particle removal rate reaches a constant level. The detachment mechanisms are rolling, slipping, or direct detachment of particles normal to the contact radius. These mechanisms are a function of particle position on the filter medium. Particles first roll or slip over the surface. They are removed only after a sufficiently long period of exposure to the flow. The mechanisms of particle detachment under continuous flow through the filter media are studied experimentally. Apart from critical cleaning spots of the fabric, changes in position are detected and analyzed as a function of filter geometry. For this

purpose, the filter medium is subdivided into four segments. Cleanability of each segment is examined. It is found that critical cleaning spots are located at the highest points of the fabric. Moreover, the degree of cleaning of the respective segment is related to the motion of particles within the segment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Abgrenzung des Themengebietes	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Reinigung	5
2.1.1	Begriff „Reinigung“	5
2.1.2	Arten von Verschmutzungen	6
2.1.3	Reinigungsmechanismen	7
2.2	Hygienic Design	8
2.2.1	Beurteilung der Reinigung	9
2.3	Reinigung von Oberflächen	13
2.3.1	Kontinuierliche Reinigung	13
2.3.2	Reinigung mithilfe pulsierender Strömung	16
2.3.3	Ablösemechanismen bei der Reinigung von Oberflächen	17
2.4	Pulsierende Reinigung von Membranen	20
2.5	Anwendungen der Reinigung im Bereich Filtration	22
2.5.1	Stülpfilterzentrifuge	22
2.5.2	Schälzentrifugen	23
2.5.3	Bandfilter	23
2.5.4	Filterpresse	24
2.5.5	Kantenspaltfilter	25
2.5.6	Übertragbarkeit der Untersuchungen auf die industrielle Anwendbarkeit	26
2.5.7	Hygienisierbarkeit von Filterelementen	26
3	Theoretische Grundlagen	31

3.1	Haftkraft	31
3.1.1	Van-der-Waals Kräfte	31
3.1.2	Elektrostatische Kraft	33
3.2	Grundlagen Strömung	37
3.2.1	Strömungscharakterisierung	37
3.2.2	Laminare und turbulente Strömung	38
3.2.3	Stationäre und instationäre Strömungen	41
3.3	Diffusion und Konvektion	42
3.3.1	Diffusion	42
3.3.2	Konvektiver Stoffübergang	43
3.4	Fluoreszenz	47
4	Materialien	49
4.1	Lösliche Verunreinigung	49
4.1.1	Riboflavin	49
4.1.2	Malzextrakt	50
4.2	Partikuläre Verunreinigung	50
4.3	Filtergewebe zur Kuchenfiltration	51
4.3.1	Überblick	51
4.3.2	Berechnung der Porosität der Gewebekonstruktionen	53
4.3.3	Eingesetzte Filtermedien	57
5	Aufbau der Versuchseinrichtungen	59
5.1	Kontinuierliche Reinigungsanlage	59
5.2	Reinigungsanlage zur pulsierenden Reinigung	61
5.3	Apparate zur Kontaminierung der Gewebe	63
5.3.1	Kontaminierungseinheit	63
5.3.2	Vakuumfiltration	64
5.3.3	Rotator	65
5.4	Messtechnik	66
5.4.1	Fluoreszenzmikroskop	66
5.4.2	Fluoreszenzspektrometer	67
6	Kontinuierliche Reinigung einer löslichen Verunreinigung	69
6.1	Vorgehensweise bei den Reinigungsversuchen	70
6.1.1	Kontaminierung der Gewebe	70
6.1.2	Experimentelle Bestimmung der Reinigungsrate und des Reinigungsverhältnisses	72

6.2	Ergebnisse lösliche Verunreinigung	73
6.2.1	Reinigungskinetik.....	73
6.2.2	Einfluss Strömungsgeschwindigkeit.....	77
6.2.3	Vergleich Oberflächenbeschaffenheit der Filtermedien	78
6.2.4	Vergleich der Webart der Filtermedien	81
6.3	Anpassung des Stoffübergangskonzepts an die Ergebnisse	83
6.4	Dimensionsanalyse	86
7	Kontinuierliche und pulsierende Reinigung einer partikulären Verunreinigung	89
7.1	Vorgehensweise bei der Reinigung.....	90
7.1.1	Kontamination der Gewebe	90
7.1.2	Experimentelle Bestimmung des Reinigungsgrades.....	91
7.2	Reinigung mithilfe kontinuierlicher Strömung	92
7.2.1	Reinigungskinetik.....	92
7.2.2	Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit.....	93
7.2.3	Einfluss der Temperatur.....	94
7.2.4	Einfluss der Partikelgröße.....	96
7.2.5	Einfluss des Filtermediums	97
7.2.6	Dimensionsanalyse.....	99
7.2.7	Flächenspezifischer Reinigungsfluidverbrauch.....	102
7.3	Reinigung mithilfe einer pulsierenden Strömung.....	103
7.3.1	Charakterisierung der pulsierenden Strömung	103
7.3.2	Einfluss der Pulsströmungsgeschwindigkeit und Zeit	104
7.3.3	Einfluss der Pulsdauer und Pulspause	105
7.3.4	Vergleich der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung	107
7.3.5	Homogenität der Reinigung und Filter-Düse Abstand.....	109
7.3.6	Vergleich von Filtermedien unterschiedlicher Dicke.....	113
7.3.7	Einfluss des pH-Werts	114
7.3.8	Dimensionsanalyse.....	117
8	Ablösemechanismen bei der Reinigung.....	121
8.1	Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung.....	121
8.2	Auswertung der Versuche.....	122
8.2.1	Bildbearbeitung in MATLAB.....	122
8.2.2	Auswertung der Daten aus der Bildbearbeitung	125
8.2.3	Bestimmung des Reinigungsgrades	127

8.2.4	Bestimmung des Partikelbewegungsanteils	127
8.3	Untersuchung der Ablösemechanismen	128
8.3.1	Reinigungsfähigkeit der unterschiedlichen Zonen	128
8.3.2	Bewegung der Partikel während der Reinigung	133
9	Gegenüberstellung der beiden Verfahren.....	137
10	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	141
A	Literaturverzeichnis	149
B	Symbolverzeichnis.....	159
C	Anhang.....	163
C.1	Berechnung der kontaminierten Oberfläche der verschiedenen Webarten	163
C.1.1	Kontaminierte Oberfläche des PRD-Gewebes	163
C.1.2	Kontaminierte Oberfläche des STN-Gewebes.....	164
C.1.3	Kontaminierte Oberfläche des TWL-Gewebes	164
C.2	Berechnung der Mantelfläche der Gewebe	165
C.3	Kalibriergeraden für Riboflavin und Malzextrakt	166
C.3.1	Riboflavin.....	166
C.3.2	Malzextrakt.....	167
C.4	Parameter und Stoffdaten zu Abbildung 6-10.....	168
C.5	Versuchsnummern und Parameter zu Abschnitt 7.2.6.....	168
C.6	Versuchsnummern und Parameter zu Abschnitt 6.3.....	169
D	Publikationsliste.....	171

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten zehn Jahren gewann die Reinigung von Anlagen und Anlagenkomponenten in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie immer mehr an Bedeutung. Grund hierfür sind stetig wachsende Anforderungen an den Verbraucherschutz. Hauser [1] geht davon aus, dass bis zu einem Viertel der Schäden durch Kreuzkontamination auf nicht ausreichend zu reinigende und sterilisierbare Produktionsanlagen zurückgeht. Die dabei entstehenden Kosten lagen 1996 in den USA zwischen 4,9 - 9,3 Milliarden Dollar. Um das Kontaminationsrisiko zwischen zwei verschiedenen Produktchargen zu verringern, ist eine sichere und effiziente Reinigung notwendig. Realisiert werden kann dies mit Bauteilkonstruktionen nach dem Konzept des Hygienic Designs, was eine leicht reinigbare und hygienegerechte Gestaltung der Anlagenkomponenten bedeutet. Leitlinien und Empfehlungen geben hierfür europaweit im Lebensmittelbereich die EHEDG (European Hygienic Engineering and Design Group), und deutschlandweit im Bereich der Steriltechnik der VDMA (Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau). Zu den gesamtwirtschaftlichen Vorteilen des Hygienic Designs gehören Einsparungen im Reinigungsaufwand (Reduzierung der Reinigungszeit, der Reinigungstemperatur und der Konzentration der Reinigungsmittel) bei gleichem Reinigungseffekt. Die genannten Einsparungen wirken sich folglich auch positiv im Sinne des Umweltschutzes aus. Insgesamt ist bei Einhaltung der Kriterien mit einer Qualitätsverbesserung der Produkte und mit einem verbesserten Verbraucherschutz zu rechnen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Reinigung in der Fest-Flüssig-Trennung im Bereich der Filtration. Bei Filtrationsanlagen ist das am schwersten zu reinigende Bauteil das Filtermedium. Aufgrund seiner Struktur weist es undurchlässige und durchlässige Stellen auf, die teilweise zu Strö-

mungsschatten führen. Stellen, die von der Strömung bzw. von dem Reinigungsmedium nicht erreicht werden, sind demnach schwierig zu reinigen. Für Filtermedien gibt es bisher keine Gestaltungshinweise und Richtlinien der EHEDG, da die Reinigung derselben unzureichend untersucht ist. Diese Arbeit widmet sich deshalb der Analyse der Reinigungsmechanismen von Filtermedien.

Die Motivation dieser Forschungsarbeit geht auf den industriellen Bedarf an Beurteilungsmethoden und Verfahren zur Reinigung von Filtermedien zurück. Es ist dabei notwendig, die einzelnen Mechanismen, welche die Reinigung beeinflussen, aufzuklären und zu verstehen. Erst dann ist eine geeignete Verfahrens- und eine optimale Filtermedienauswahl möglich.

Der Erfolg der Reinigung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. An erster Stelle steht die Art der Verunreinigung. Mit Verunreinigungsart ist in diesem Fall das Verhalten in Bezug auf das Reinigungsfluid, löslich oder unlöslich, gemeint. Um den Einfluss der Verunreinigungsart auf das Reinigungsergebnis zu klären, erfolgten im Rahmen dieser Untersuchungen unterschiedliche Verunreinigungen und deren Abreinigung von Polymergeweben. Die Wahl fiel dabei auf eine lösliche Verunreinigung, bei der der Stoffübergang im Vordergrund steht, und auf eine partikuläre Verunreinigung, die den Gesetzen der Adhäsion folgt. Doch nicht nur die Reinigungsfähigkeit verschiedener Kontaminationsarten ist von großer Bedeutung, auch der Einfluss der Struktur der Filtermedien (Webart, Oberfläche, Material) spielt bei der Reinigung von Filtermedien eine wichtige Rolle. Ein dritter Punkt, der den Reinigungserfolg maßgeblich beeinflusst, ist die Mechanik. Darunter fällt vor allem die Strömungsart, also die kontinuierliche und die pulsierende Strömung.

Um den Zusammenhang zwischen Reinigungsergebnis und mechanischem Einfluss bzw. Stoffübergang theoretisch beschreiben und vorhersagen zu können, sollen im Rahmen dieser Arbeit sowohl Kennzahlen neu bestimmt, als auch bekannte aus der Literatur herangezogen werden. Damit soll es gelingen, das Reinigungsergebnis eines bestimmten Filtermediums mit definierter Geometrie theoretisch vorherzusagen.

1.2 Abgrenzung des Themengebietes

Im Rahmen dieser Arbeit sind die folgenden Fragestellungen zu klären:

- i) *Aufklärung der Mechanismen bei der kontinuierlichen Reinigung von Filtermedien beladen mit einer löslichen Verunreinigung und Vorhersage des Reinigungsergebnisses.*

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Mechanismen bei kontinuierlicher Reinigung von gewebten Polymerfiltermedien beladen mit einer löslichen Verunreinigung untersucht werden. Es soll hierbei eine Fortsetzung der Arbeit von Stahl [2] erfolgen, der das Modell der Rohrreihe [3] für die theoretische Berechnung des Stoffübergangs auf die Reinigung von Stützgeweben aus Metallen anwendete. Er konnte dieses einfache Modell der Rohrreihe benutzen, da die untersuchten Stützgewebe, eine einfache und sehr durchlässige Struktur besaßen. Diese Arbeit beschäftigt sich aber mit Filtergeweben, die eine viel kompliziertere und sehr dichte Struktur aufweisen, auf die das Modell der Rohrreihe zur Berechnung des Stoffübergangs nicht anwendbar ist. Es ist deshalb notwendig, die Zusammenhänge zwischen den Strömungseigenschaften und den Filtereigenschaften in Bezug auf das Reinigungsergebnis zu untersuchen und mithilfe von bekannten Kennzahlen (beispielsweise im Bereich des Stoffübergangs und der Fluidmechanik) das Reinigungsergebnis theoretisch zu beschreiben und vorherzusagen.

- ii) *Das Verfahren mit pulsierender Strömung führt zu einer Verbesserung des Reinigungsgrades gegenüber dem rein kontinuierlichen Verfahren, auch hier ist eine Vorhersage des Reinigungsergebnisses möglich.*

Neben der kontinuierlichen Reinigung stellt die Reinigung mithilfe pulsierender Strömung ein weiteres vielversprechenderes Verfahren dar. Einige Arbeiten im Bereich der Reinigung von Wärmetauscheroberflächen behandelten bisher die pulsierende Rohrreinigung mit aussichtsreichen Ergebnissen. Es soll nun untersucht werden, ob dieses Verfahren auch auf die Reinigung von Filtergeweben anwendbar ist. Jedoch gibt es bei dem Versuchsaufbau einige Abänderungen. Bei der Rohrreinigung wurde dem kontinuierlichen Strom eine oszillierende Strömung überlagert, die Pulsation ist somit über den kompletten Rohrquerschnitt aktiv. Bei der Reinigung von Filtermedien in industriellen Anlagen ist, aufgrund des hohen Verbrauchs an Reinigungsfluid, eine pulsierende Strömung über den ganzen Filterquerschnitt nicht realisierbar, weshalb in dieser Arbeit die

Pulsation über eine Düse erfolgt, die wenige Zentimeter vor dem Filtermedium lokalisiert ist. Ziel bei diesen Untersuchungen ist es, die Einflüsse des Verfahrens auf das Reinigungsergebnis herauszuarbeiten und diese Einflüsse mithilfe von dimensionslosen Kennzahlen beschreiben und vorhersagen zu können. Einflussfaktoren, die Bestandteil dieser Arbeit sind, sind die Pulsdauer (Länge eines Pulses), die Pulspause (Dauer der Pause zwischen zwei Pulsen), die Strömungsgeschwindigkeit eines Pulses, die gesamte Prozesszeit, der Abstand der Düse von dem Filtermedium und die Geometrie des Filters.

iii) Schwachstellen bei der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung und Untersuchung der Ablösemechanismen bei der Reinigung

Ein wichtiger Punkt bei Betrachtung der Filtergeometrie ist vor allem die Fragestellung, wo sich auf dem Gewebe die kritischen Reinigungsstellen befinden. Da das Gewebe eine sehr komplexe Struktur besitzt, ist es von großem Interesse herauszufinden, wie die Partikelablösung erfolgt. Es ist die Fragestellung zu klären, ob die Partikel sich während der Reinigung direkt ablösen, ohne über das Gewebe zu rollen oder zu gleiten, oder ob tatsächlich Partikelbewegungen während der Reinigung stattfinden.

iv) Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeit beider Verfahren hinsichtlich Reinigungs-fluidverbrauch

Die Untersuchung der Reinigungsverfahren mit kontinuierlicher und pulsierender Strömung erfordert abschließend einen Vergleich beider Verfahren miteinander. Es ist zu klären, ob das Verfahren mit pulsierender Strömung eine bessere Reinigungsfähigkeit der Filtermedien liefert und ob die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf den Waschmittelverbrauch auch gewährleistet ist. Deshalb sollen hier die beiden Verfahren hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz gegenübergestellt werden.

2 Stand der Technik

2.1 Reinigung

Reinigung beschreibt nach Reiff et al. [4] die dauerhafte Ablösung von mindestens zwei Substanzen, die aneinanderhaften. Danach entsteht eine „reine“ Oberfläche. Andere Autoren sprechen in diesem Zusammenhang von „sensorisch sauber“ [5], „mikroskopisch sauber“ [6] oder „optisch sauber“ [7].

Reuter [8] unterteilt weiterführend die Reinheit in zwei verschiedene Arten: die physikalische und die chemische Sauberkeit. Unter physikalischer Sauberkeit versteht er, dass keinerlei sichtbare Verunreinigung auf der Oberfläche mehr zu erkennen ist. Die damit zusammenhängende Prüfung kann jedoch nur auf Oberflächen erfolgen, die für die jeweilige Methode zugänglich sind. Den Begriff der chemischen Sauberkeit verwendet er, wenn sich keinerlei chemisch nachweisbaren Rückstände mehr auf der Oberfläche befinden.

2.1.1 Begriff „Reinigung“

Reinigung kann je nach Gebrauch verschiedene Bedeutungen haben. Im Bereich der Querstromfiltration wird beispielsweise von Reinigung im Zusammenhang mit der Reduzierung der Deckschicht, auch Fouling-Schicht genannt, gesprochen. Die Deckschicht bildet sich während des Filtrationsprozesses und hat eine Verminderung des Permeatflusses zur Folge. Durch Rückspülen mit Säuren bzw. Laugen wird ein Ablösen der Foulingschicht erreicht und der Permeatfluss durch die Membran steigt wieder an. Mit Reinigung ist hier also die Regenerierung des Systems gemeint, um eine Erhöhung des Permeatflusses zu erreichen [9-26]. Im Rahmen dieser Arbeit geht es jedoch darum, eine verschmutzte Oberfläche, in unserem Fall das Filtermedium, dahin gehend zu reinigen, dass die Verschmutzung weitestgehend von der Oberfläche abgelöst

wird, so dass beispielsweise keine Kreuzkontaminationen die nächste Charge verunreinigen können. Dies ist besonders in der Pharma- und Lebensmittelindustrie von großer Bedeutung. Die Reinigung wird im Allgemeinen von vier Faktoren beeinflusst (Sinerscher Kreis): der Chemie, Mechanik, Zeit und Temperatur. Alle vier Faktoren sind voneinander abhängig und müssen, um eine optimale Reinigung zu erhalten, in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Eine wesentliche Funktion für den Reinigungserfolg übernimmt neben den bisher erwähnten Faktoren auch die Art der Verunreinigung und die Geometrie der verschmutzten Oberfläche. Je mehr undurchlässige Stellen das zu reinigende Objekt besitzt, desto schlechter ist seine Reinigungsfähigkeit.

2.1.2 Arten von Verschmutzungen

Die Einteilung der Verschmutzungsarten kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Verunreinigungen können beispielsweise physikalischen, chemischen oder mikrobiellen Ursprungs sein. Rückstände aus Verarbeitungsmaschinen, vom Menschen oder von der Umgebung zählen zu physikalischen Ursprung, Rückstände von Reinigungs- oder Schmiermitteln zu chemischen und Mikroorganismen wie Sporen, Bakterien und Pilze, die sich in Anlagen festsetzen können, gehören zu mikrobiellen Verunreinigungen.

Eine weitere Einteilung kann nach dem Verhalten gegenüber Wasser erfolgen:

- die **partikuläre Verunreinigung**: Diese Art der Verschmutzung kann nicht mehr weiter aufgelöst werden. Es kann lediglich eine Resuspension erfolgen. Dazu zählen einzelne Zellen, Mikroorganismen, unlösliche Kristalle oder Feststoffe. Für einen Reinigungserfolg ist es notwendig, die Adhäsionskräfte zwischen partikulärer Verunreinigung und Oberfläche zu überwinden.
- die **wasserlösliche Verunreinigung**: Durch Reinigung mit Wasser kann diese Art der Verschmutzung aufgelöst werden. Dazu zählen niedermolekulare Kohlenhydrate, Salze und Säuren. Hier steht vor allem der Stoffübergang für die Reinigung im Vordergrund.
- die **quellbare Verunreinigung**: In Kontakt mit Säuren oder Laugen ist es möglich, nach einem anfänglichen Quellvorgang, diese Art der Verschmutzung zu entfernen (Proteine, höhermolekulare Kohlenhydrate). Auch hier steht der Stoffübergang im Vordergrund.
- die **emulgierbare Verunreinigung**: Dazu gehören vor allem Fette, Öle und Lipoide.

- **kohäsive Verunreinigung:** Diese Art der Verunreinigung stellt eine flächenartige und nur schwer auflösbare Verschmutzung dar. Ein Beispiel hierfür sind Biofilme.

Im Rahmen dieser Arbeit wird hauptsächlich auf die ersten beiden Verunreinigungsarten eingegangen. Als partikuläre Verunreinigung kommen Melaminharzpartikel und als wasserlösliche Verunreinigung kommen Riboflavin bzw. Malzextrakt-Esculin zum Einsatz.

2.1.3 Reinigungsmechanismen

Wie bereits beschrieben sind für den Erfolg eines Reinigungsprozesses hauptsächlich vier Faktoren entscheidend: die Zeit, Temperatur, Mechanik und Chemie. Die Faktoren sind jeweils voneinander abhängig, aber in ihrer Größe veränderbar. Für jede Verunreinigungsart ist ein ganz bestimmtes Verhältnis der einzelnen Komponenten zueinander notwendig. Sie werden oft in einem Kreisdiagramm, dem Sinnerschen Kreis, dargestellt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Faktoren genauer eingegangen:

Zeit: Je nach Verunreinigungsart ist ein Anquellen und Dispergieren des Schmutzes notwendig, um ihn von der Oberfläche abzulösen. Die Reinigungszeit, die dafür nötig ist, ist wiederum von der Temperatur und der Wirksamkeit des Reinigungsmittels abhängig.

Mechanik: Unter Mechanik ist in diesem Zusammenhang die Strömungsmechanik oder die Mechanik durch Bürsten etc. gemeint. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten bewirken ein schnelleres und erfolgreicher Ablösen der Verschmutzung von Oberflächen.

Temperatur: Die Temperatur beeinflusst die Reinigung von löslichen Verunreinigungen über die bekannten Stoffübergangsgesetze. Je höher die Temperatur, desto besser lässt sich die Verunreinigung entfernen. Jedoch muss die Temperatur so gewählt werden, dass die zu reinigenden Materialien nicht beschädigt werden.

Chemie: Mit Chemie ist in diesem Fall die Art und Konzentration des Reinigungsmittels gemeint. Reinigungsmittel sind komplexe Mischungen aus verschiedenen Komponenten, die alle eine andere Wirkungsweise haben. Es gibt Säuren und Laugen, die Salze lösen sollen, Komplexbildner, die als Wasserenthärter fungieren, Builder, die für die Dispergierung von Schmutzpartikeln zum Einsatz kommen und Synergieeffekte mit Tensiden eingehen, sowie zuletzt die Tenside, die das Ablösen von Schmutz- und Fettpartikeln von Oberflächen verbessern.

Durch Erhöhen eines Faktors können die anderen Faktoren reduziert werden, um das gleiche Reinigungsergebnis zu erhalten. Wird beispielsweise die Strömungsgeschwindigkeit beim Reinigungsprozess erhöht, wird das gleiche Reinigungsergebnis zu einem früheren Zeitpunkt, bei geringeren Temperaturen oder mit geringeren Reinigungsmittelkonzentrationen erreicht. Die vier Faktoren kompensieren sich demnach gegenseitig. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird vor allem auf den Faktor der Mechanik eingegangen.

2.2 Hygienic Design

Ein weiterer Begriff, der in Zusammenhang mit der Reinigung von Anlagen oftmals auftritt, ist das Hygienic Design. Hygienic Design bezeichnet die hygienegerechte Konstruktion und Beurteilung von Anlagen und Anlagenkomponenten vor allem in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie. Das Ziel besteht darin, Anlagen in Bezug auf die Reinigbarkeit konstruktiv optimal zu gestalten. Dabei spielt vor allem die richtige Werkstoffwahl, die Oberflächenbeschaffenheit und die Vermeidung von Toträumen und Strömungsschatten eine zentrale Rolle. Denn nur eine rückstandslose Reinigbarkeit kann die Gefahr einer Kreuzkontamination vermeiden. Die Forderung nach immer größerer Automatisierung der Prozesse in der Lebensmittel- und Pharmabranche hat zur Konsequenz, dass auch die Reinigungsprozesse automatisiert werden sollen (CIP-Cleaning in Place). Die CIP-Reinigung erfordert im Optimalfall keine Demontage einzelner Anlagenkomponenten mehr.

Offt besteht der Trugschluss, dass bei Reinigungsproblemen eine Intensivierung der Reinigung notwendig ist. Eine intensivere Reinigung geht jedoch oft mit einer Erhöhung der Lösemittelkonzentration, der Spüldauer und der Temperatur einher. Die hohen Temperaturen und Lösemittelkonzentration können jedoch Dichtungselemente in den Bauteilen zerstören und somit die Dichtfunktion stark beeinträchtigen. Hohe Spüldauern ziehen einen sehr großen Zeitaufwand und einen sehr hohen Verbrauch an Reinigungsmittelmengen nach sich, was wiederum die Umwelt stark belasten kann. Somit ist es meistens klüger, die komplette Anlage nach Hygienic Design Kriterien aufzubauen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes kann dazu weiterführende Literatur [27, 28] herangezogen werden. Um die Reinigungsfähigkeit von Bauteilen beurteilen und miteinander vergleichen zu können, existieren verschiedene Beurteilungsverfahren, auf die im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird.

2.2.1 Beurteilung der Reinigung

Zur Beurteilung der Reinigung, Sterilisierbarkeit und Durchdringungsfestigkeit, besonders bei aseptischen Prozessen sehr wichtig, hat die European Hygienic Engineering Design Group (EHEDG), einige Testmethoden entwickelt [29-31]. Doch nicht nur die EHEDG sucht nach neuen Prüfmethode n zur Beurteilung der Reinigung, sondern auch der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) widmete sich in den letzten Jahren dieser Aufgabe. Er entwickelte in Zusammenarbeit mit der TU München ein weiteres Prüfsystem, basierend auf einem Abstrichtest, bei dem der ATP-Gehalt gemessen und ausgewertet wird. Ein weiterer Reinigungstest des VDMAs ist der Riboflavintest. Mit ihm soll es auch Anlagenbauern und Anwendern gelingen selbst die Reinigbarkeit der Anlagenkomponenten zu überprüfen. Im Folgenden sind nun die wichtigsten und gebräuchlichsten Reinigungstests kurz zusammengefasst.

2.2.1.1 EHEDG Reinigbarkeitstest

Hierbei handelt es sich um einen mikrobiellen Reinigungstest. Der zum Einsatz kommende Keim ist der temperaturresistente und schnell sporulierende *Bacillus stearothermophilus var. calidolactis*. Bei diesem Reinigungstest wird die Reinigungsfähigkeit des zu untersuchenden Bauteils mit einem Referenzrohr (gerades Rohrstück mit definierter und hygienisch guter Oberfläche, Mittenrauwert R_a von $0,5 \mu\text{m}$) verglichen. Nach der Kontaminierung des Referenzrohres und des Testobjektes durch ein vollständiges Auffüllen mit Keimsuspension (Konzentration: 10^5 Sporen / ml) sind alle beweglichen Teile mit Druck zu bewegen, um eine Benetzung der dynamischen Bereiche der Dichtungen zu gewährleisten. Nach Entleeren des Referenzrohres und des Testobjektes ist es unter Sterilluft zu trocknen. Anschließend erfolgt der Einbau in die Reinigungsanlage, die aus zwei Stapelbehältern, einem Drosselventil, einer regelbaren Kreiselpumpe und der entsprechenden Ringleitung besteht. Die Reinigung findet mit einem mild alkalischen Reinigungsmittel bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m/s}$ bezogen auf den Durchmesser des Referenzrohres und einem Gegendruck von ca. 1 bar statt. Um Beeinflussungen durch die Strömung zu vermeiden, ist es notwendig an Ein- und Auslauf Beruhigungsstrecken einzubauen. Das Testobjekt wird dem Referenzrohr vorgeschaltet.

Folgende Schritte werden bei der Reinigung durchgeführt:

- *Vorspülen mit Kaltwasser (1 min)*
- *Zirkulationsreinigung mit Lauge (Konzentration: 1 %, 10 min, 62°C)*
- *Nachspülen mit Kaltwasser (1 min)*

Nach der Reinigung ist das Referenzrohr und das Testobjekt mit Agar auszukleiden und bei 58°C 22 h lang zu bebrüten. Danach erfolgt ein aufwendiges Herauspräparieren aus den Bauteilen. Da der *Bacillus stearothermophilus* nach dem Anwachsen eine gelbe Farbreaktion hervorruft, können nun die kritischen Reinigungsstellen des Testobjektes optisch auf dem herauspräparierten Agar detektiert werden. Für eine aussagekräftige Beurteilung der Reinigung sollen mindestens fünf Wiederholungen des Testes erfolgen, unter denen mindestens drei reproduzierbare Ergebnisse vorhanden sein sollen. Dabei muss im Referenzrohr 5-30 % der Innenfläche nach der Reinigung gelb verfärbt sein.

2.2.1.2 EHEDG –Test zur Überprüfung der Sterilisierbarkeit

Diese Methode hat das Ziel, sogenannte „kalte“ Stellen in Bauteilen ausfindig zu machen, die keine zuverlässige und vollständige Abtötung von Mikroorganismen während der Reinigung ermöglichen. Hier kommt der Keim *Bacillus Subtilis* zum Einsatz. Nach Zerlegung des Testbauteils wird es mit einer hochkonzentrierte Keimsuspension ($5 \cdot 10^7$ Sporen / ml) benetzt und getrocknet. Voraussetzung für eine aussagekräftige Durchführung des Tests ist, dass die Sporen alle produktberührenden Teile (Dichtungen und Oberflächen) verkeimen. Nach dem Trocknen wird das wieder zusammengebaute Testobjekt in die Sterilisierungsanlage eingefügt. Zur Sterilisation wird das kontaminierte Bauteil 30 min mit Sattedampf bei 121°C und einem Gegendruck von 2 bar durchströmt. Um noch anhaftende Sporen detektieren zu können, erfolgt eine Zirkulation von sterilem Nährmedium 5 Tage bei konstanter Temperatur durch das Testbauteil. So kann es auch durch die Sterilisation stark geschwächten Sporen gelingen auszukeimen. Falls das geschieht, trübt sich die sonst klare Nährlösung und es ist eine mikroskopische Überprüfung notwendig. Ist diese positiv, gibt das einen Hinweis auf mindestens eine „kalte“ Stelle im Bauteil, die nicht vollständig sterilisiert werden konnte. Die Versuche müssen mindestens dreimal mit demselben Bauteil durchgeführt werden und zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

2.2.1.3 EHEDG-Test zur Durchdringfestigkeit

Im aseptischen Bereich sind die Anforderungen an die Anlagenkomponenten noch etwas höher. Die Komponenten müssen nicht nur sterilisierbar und leicht reinigbar sein, sondern es muss dabei auch noch gewährleistet sein, dass keine Mikroorganismen von außen in den Produktbereich gelangen. Mithilfe dieser Testmethode soll die Durchdringfestigkeit untersucht werden. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf Verbindungsstellen wie Schweißnähten, statischen Elastomerdichtungen und dynamischen Dichtungen. Als mikrobieller Organis-

men kommen Bakterien des Stammes *Serratia mercrescens* zum Einsatz, da dieser Mikroorganismus in der Lage ist in kleinste Spalte, auch entgegen des Druckgefälles, einzudringen. Das Bauteil wird nach der unter 2.2.1.2 beschriebenen Methode sterilisiert, und in den Versuchsstand eingebaut. Nun wird auf der Produktseite keimfreie Nährbouillon im Kreislauf gefördert. Danach erfolgt von außen das Ausstreichen der Bakterienzellen auf den zu untersuchenden Stellen. Dieser Vorgang wird täglich über einen Zeitraum von drei Tagen wiederholt. Gelingt es den Bakterienzellen durch die Dichtungen hindurchzuwandern, werden sie sich auf der Produktseite vermehren und ein Abstrichtest auf der Produktseite fällt positiv aus.

2.2.1.4 VDMA-Qualified Hygienic Design Prüfsystem (QHD)

Als Verschmutzungsmatrix kommt hierbei eine Stärke-Protein-Lösung zugesetzt mit Backhefe zum Einsatz. Die Hefezellen liefern das ATP und können über den ATP-Gehalt, der mithilfe eines Abstrichtests bestimmt wird, nachgewiesen werden. Nach Benetzung und Trocknen der produktberührten Oberflächen wird das Bauteil in die Reinigungsanlage eingebaut und mit einem ähnlichen Reinigungsablauf, wie in 2.2.1.1 beschrieben, gereinigt. Die Bewertung des Reinigungsergebnisses erfolgt über konfektionierte ATP-Tupfer, die in einem speziellen Bioluminometer gemessen werden. Das Bioluminometer gibt den ATP-Gehalt in relativen Lichteinheiten aus.

2.2.1.5 VDMA-Riboflavintest

Alle bisher erwähnten Prüfverfahren müssen (aufgrund ihrer mikrobiellen Detektionsmatrix) unter sterilen Bedingungen erfolgen. Deshalb ist es Anlagenbauern oder Anlagenbetreibern, aufgrund des fehlenden Equipments für die Durchführung dieser Tests, unmöglich ihre Anlagen selbst auf Reinigbarkeit zu überprüfen. Der VDMA entwickelte daher ein weiteres Testverfahren mit einer recht einfachen Handhabung, das Anwendern von Anlagen und Apparateherstellern eine Überprüfung der Reinigungsfähigkeit ermöglicht. Der Riboflavintest [32] basiert auf einer Fluoreszenz-Sichtprüfung, wobei als fluoreszierende Substanzen sowohl Riboflavin als auch Fluoreszein zum Einsatz kommen. Hauptziel ist der Nachweis der vollständigen Reinigbarkeit, jedoch stellt das Ergebnis der Reinigung nur eine qualitative Aussage dar. Bei einer mehrfachen Durchführung des Fluoreszenztests können vorgenommene Maßnahmen zu Optimierungen am Bauteil qualitativ bewertet werden. Der Fluoreszenzstoff (Riboflavin oder Fluoreszein) wird in einer empfohlenen Konzentration in Wasser (mit mindestens Trinkwasserqualität) gelöst und danach erfolgt die Zugabe von *Hydroxy-*

ethylcellulose, die zur Erhöhung der Viskosität und zur Erhöhung der Schichtdicke auf der Oberfläche dient. Die Kontaminierung der zu untersuchenden Bauteile bzw. Anlagen kann unter zu Hilfenahme eines Zerstäubers oder durch Fluten und anschließendem Entleeren des Bauteils geschehen. Wichtig dabei ist, dass alle produktberührten Oberflächen mit der Fluoreszenzlösung benetzt sind. Danach soll die im Betrieb übliche Reinigungsprozedur durchgeführt werden. Die Detektion der Testlösung erfolgt mithilfe einer Fluoreszenzlampe durch eine Sichtprüfung. Eine vollständige Reinigung ist dann gewährleistet, wenn keinerlei sichtbare Fluoreszenz an den Oberflächen des Bauteils zu erkennen ist.

2.2.1.6 Reinigungstest für Filtermedien

Die aufgeführten Reinigungstests kamen bisher nur für Bauteile, wie Rohrleitungen, Behälter und Ventile, zur Anwendung. Für Filtermedien, die in einem Filtrationsprozess die am Schwierigsten zu reinigende Komponente darstellen, gibt es bisher nur wenige Untersuchungen. Stahl et al. [33] entwickelte eine mikrobiologische Reinigungsmethode auf der Basis des EHEDG-Reinigungstests, mit der die Reinigung von Filtermedien qualitativ bewertet werden kann. Wie beim EHEDG-Test kam auch hier der Keim *Bacillus stearothermophilus var. calidolactis* zum Einsatz. Die Kontamination der Metallfiltergewebe erfolgt in einer Kontaminierungsanlage, bei der eine Sporen-Suspension mit einer Konzentration von 15 000 *Bacillus* Sporen/ ml mit einem Volumenstrom von 0,8 L/min und einer Temperatur von 22°C 15 min durchströmt wird. Danach ist das Filtermedium in eine spezielle Düsenapparatur einzusetzen, mit der eine Untersuchung verschiedener Düsen durchführbar ist. Nach der Reinigung werden die Filter in eine Petrischale mit Nähragar gelegt und anschließend bei 60°C für 18 Stunden bebrütet. Als Agar kommt Shapton und Hinds Agar zum Einsatz, das Bromkresol Purpur als Indikator enthält, der durch die von den Bazillus-Stämmen produzierende Säure seine Farbe von violett zu gelb wechselt. Innerhalb der Bebrütungszeit erfolgen zu verschiedenen Zeiten Aufnahmen des gereinigten Filters. Da der *Bacillus stearothermophilus* nach dem Anwachsen eine gelbe Farbreaktion hervorruft, können die nicht gereinigten Stellen detektiert werden. Die qualitative Auswertung erfolgt üblicherweise mithilfe der Software Photoshop© und ImageJ, die es ermöglicht, die nach der Reinigung noch verschmutzte (gelbe) Fläche zu bestimmen. Der Nachteil dieser Methode besteht in der aufwendigen Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung. Deshalb ist für die Zukunft von Interesse einen Reinigungstest zu entwickeln, der auch für Apparateanwender leicht durchführbar ist.

2.3 Reinigung von Oberflächen

Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über bisher veröffentlichte Arbeiten im Bereich der Oberflächenreinigung. Anwendung finden hier zwei verschiedene Verfahren:

- die Reinigung mithilfe einer stationären Strömung
- die Reinigung mithilfe einer pulsierenden Strömung.

2.3.1 Kontinuierliche Reinigung

Eine Reihe von Veröffentlichungen beschäftigte sich bisher mit der Reinigung von Oberflächen im Molkereibetrieb [34-39]. Die zu reinigenden Oberflächen sind meist Plattenwärmetauscher, die zur Erhitzung von Milch eingesetzt werden. Nach dem Prozess bleibt ein festverkrusteter und somit schwer reinigbarer Milchbelag, der die Wärmekapazität während des Prozesses enorm herabsetzt, auf den Oberflächen zurück. Graßhoff [36] führte als einer der ersten Untersuchungen zum Reinigen der Wärmetauscheroberflächen durch. Das Aufbringen eines reproduzierbaren Milchbelags auf die Testflächen erfolgte durch Zirkulation von Rohmilch bei 85°C. Graßhoff untersuchte bei der Reinigung verschiedene Parameter wie Geschwindigkeit, Temperatur, Reinigungszeit und Einfluss des Reinigungsmittels. Er stellte fest, dass die Reinigung des Milchbelages ein sehr komplexer Prozess ist, der nicht mit einfachen mathematischen Modellen beschreibbar ist. Weiterführende Untersuchungen sind bei Gillham [40] zu finden. Er betrachtete die Reinigungskinetik der Abreinigung des Milchproteins mithilfe einer NaOH-Lösung als Reinigungslösung etwas genauer. Er benutzte als Verunreinigung WPC (Whey protein concentrated) Gel, das als Modellsubstanz für das Milchfouling gut geeignet ist. Gillham fand heraus, dass sich der Prozess der Abreinigung des Foulings von den Wärmetauscheroberflächen in drei Phasen einteilen lässt: die Schwellphase, die Phase des konstanten Massentransports und schließlich die abfallende Phase.

In Abbildung 2-1 ist im linken Diagramm der Verlauf der Reinigungsrate inklusive der drei verschiedenen Phasen dargestellt.

Die Reinigungsrate R_R ist definiert wie folgt:

$$R_R = \frac{\dot{M}_{kont}}{A_{kont}}. \quad 2-1$$

Hierbei ist \dot{M}_{kont} der Massenstrom der Verunreinigung und A_{kont} die kontaminierte Fläche.

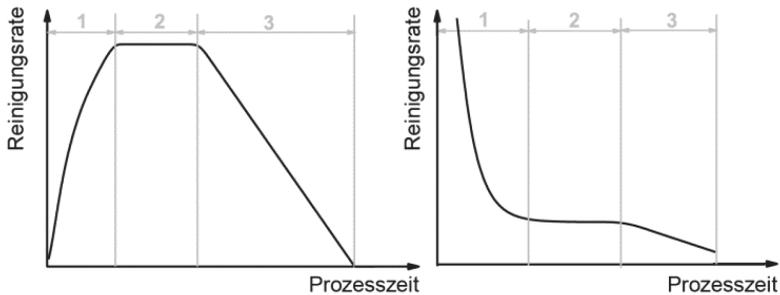


Abbildung 2-1: Reinigungskinetiken, links: Reinigungsprozess von kontaminierten Oberflächen [35, 41], rechts: Reinigungsprozess von kontaminierten Rohren [39]

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass in Phase 1 (Schwellphase) die Reinigungsrate ansteigt. Die Proteinschicht, die sich auf der untersuchten Oberfläche befindet, beginnt bei Kontakt mit der Reinigungslösung zu quellen und die gelartigen Strukturen werden mit der Strömung abtransportiert. Zurück bleibt eine dünne homogene Schicht an Verunreinigung, die in Phase 2 kontinuierlich mit der Strömung abgetragen wird. Deshalb ist diese Phase durch eine konstante Reinigungsrate gekennzeichnet. Am Ende der 2. Phase sind nur noch einzelne Stellen mit Verunreinigung vorhanden, es ist kein homogener Film mehr erkennbar. Dies hat zur Folge, dass in Phase 3 die Reinigungsrate immer weiter abnimmt bis im Idealfall keine Verunreinigung mehr vorhanden ist. Xin et al. [41] bestätigte die verschiedenen Phasen bei der Abreinigung von WPC ebenfalls.

Welchner [39] dagegen untersuchte das Ausspülverhalten hochviskoser Produkte aus Rohrleitungen. Dabei füllte er ein Rohrstück komplett mit einer hochviskosen Verunreinigung und versuchte es mit Wasser aus der Rohrleitung auszuspülen. Die Detektion der Verunreinigung erfolgte dabei direkt über die Resthaftmenge im Rohr und indirekt durch Messung der Verunreinigungskonzentration im Auslauf des Rohres. Für eine Glukosesirup-Lösung ergab sich dabei die in Abbildung 2-1 (rechts) schematisch dargestellte Reinigungskinetik. Auch hier konnten drei verschiedene Phasen erkannt werden. In der ersten Phase ist ein Abfall der Reinigungsrate zu beobachten. In dieser Phase erfolgt der Austrag der Verunreinigung in der Mitte des Rohres und nur eine dünne Schicht an Verunreinigung bleibt zurück. Diese Schicht wird dann in Phase 2, wie bei dem Reinigungsverlauf von Oberflächen (siehe Abbildung 2-1 links) gleichmäßig (konstante Reinigungsrate) abgetragen. Es bleiben nur noch vereinzelt Stellen

mit Verunreinigung zurück, die dann in der letzten Phase ausgetragen werden (abnehmende Reinigungsrate). Beide Reinigungskinetiken zeigen in der zweiten Phase ein Plateau im Verlauf der Reinigungsrate. Bei den Untersuchungen von Welchner wurde deutlich, dass der Zeitpunkt des Auftretens des Plateaus stark von der Viskosität der Verunreinigung und von der Temperatur des Spülfluides abhängt. Hofmann [38] ging 2007 noch weiter und entwickelte eine Qualifizierungsmethode zur Reinigung von Rohrleitungen. Er verwendete dabei die konstante Reinigungsrate in Phase 2 zur Bestimmung des Stoffübergangs zwischen Fluid und Verunreinigung und berechnete die zugehörige Sherwood- und Reynolds-Zahl. Somit war es ihm möglich, die Reinigung von Rohren unterschiedlicher Geometrie zu vergleichen und zu beurteilen. Eine solche Vorgehensweise wäre auch bei Filtermedien interessant. Damit wäre es möglich, die Reinigungsfähigkeit von Filtermedien verschiedener Geometrie beurteilen, vergleichen und vorhersagen zu können.

Die oben genannten Veröffentlichungen beschäftigten sich hauptsächlich mit löslichen Verunreinigungen. Jedoch kann die Art der Verunreinigung auch als partikuläres System vorliegen. Mit der Reinigung partikulärer Verunreinigungen von Oberflächen beschäftigte sich 2005 Uwe Beck [34]. Er entwickelte dabei eine Strömungszelle, in die er Oberflächen verschiedener Rauigkeiten, Oberflächenanisotropien und Oberflächenenergien einspannen konnte. Dabei untersuchte er die Reinigung und Haftung von Polystyrolpartikeln und Hefezellen. Auch Bobe [42] beschäftigte sich mit dieser Problemstellung. Er fand heraus, dass die Struktur einer Oberfläche und das Größenverhältnis zwischen Partikel und Struktur einen größeren Einfluss auf die Reinigung haben als der Rauheitskennwert R_a bzw. R_z der Oberfläche. Ebenso erkannte er, dass sich Oberflächen mit kleiner Oberflächenenergie besser reinigen lassen als Oberflächen hoher Energie. Weigl [43] dagegen untersuchte in seiner Arbeit direkt die Trennkräfte von Mikroorganismen und Partikeln auf Oberflächen. Er benutzte drei verschiedene Methoden zur Untersuchung der Haftung: den Strömungskanal, die Zentrifugenmethode und die AFM (Atomic-Force-Microscope)-Methode. Benezech [44] entwickelte eine Testmethode für eine CIP (Cleaning in place)-Reinigung von Anlagen in der Lebensmittelindustrie. Er untersuchte dabei die Reinigungsfähigkeit einer Verdrängerpumpe. Als Modellverunreinigung setzte er *Bacillus cereus* Sporen ein. Dieser Bakterienstamm ist zum einen sehr temperaturbeständig und zum anderen weist er eine starke Anhaftung an verschiedenen Oberflächen auf. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass nach der Reinigung die Pumpe in Einzelteile zerlegt, die Teile mit Nähragar ausgegossen und nach der Inkubationszeit das Nähragar vorsichtig herausprepariert werden

muss. In einer Veröffentlichung von Blel et al. [45] geht es um die Untersuchung der hydrodynamischen Effekte bei der Reinigung. Er untersuchte dabei verschiedene Rohrgeometrien auf ihre Abreinigung von *Bacillus cereus* und brachte die Ergebnisse in Zusammenhang mit strömungstechnischen Untersuchungen (Strömungsmessungen und Messungen der Wandschubspannungen in den Rohrstücken). Wandschubspannungsmessungen an einem geraden Rohrstück führte Bergmann [46] schon 18 Jahre vorher durch und brachte diese in Verbindung mit dem Reinigungseffekt.

2.3.2 Reinigung mithilfe pulsierender Strömung

Da die Methoden der Rohr- und Oberflächenreinigung nur begrenzt Erfolge zeigten, setzte sich in den letzten Jahren immer mehr die Reinigung mithilfe pulsierender Strömung durch. Vor allem in der Milchindustrie, wo sich während der thermischen Behandlung von Milch und Milchprodukten eine Fouling-Schicht auf der Wärmetauscheroberfläche bildet, welche die Heizeffektivität drastisch verschlechtern kann, wird dieses Verfahren eingesetzt. Ergebnisse aus der Oberflächenreinigung haben gezeigt, dass mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auch die Reinigungsfähigkeit verbessert wird, da höhere Kräfte und höhere Wandschubspannungen auf die Verunreinigungen wirken. Oft sind jedoch die benötigten Geschwindigkeiten mit kontinuierlicher Strömung aufgrund technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte nicht praktikabel. Die Idee war nun, den gleichen Effekt mithilfe einer zeitlich begrenzten Erhöhung der Geschwindigkeit zu erreichen. Dabei wird einer stationären Strömung ein Pulsstrom mit Frequenzen von bis zu einem Hertz überlagert. Dadurch erhöht sich die Schubspannung, die auf die Rohrwand wirkt und verbessert somit die Reinigung. Edwards und Wilkinson [47] stellten schon 1971 die Anwendungen der pulsierender Strömung zusammen. Förster et al. [48] machten erste Versuche mit pulsierender Strömung zur Abreinigung einer Foulingschicht aus CaSO_4 Kristallen. Für die pulsierende Strömung wurde dabei einer stationären Strömung eine oszillierende Strömung überlagert, was mithilfe einer Kolbenpumpe, deren Saugseite verschlossen war, realisiert wurde. Der Kolbenhub ließ sich stufenlos verstellen, was eine Einstellung der Geschwindigkeitsamplitude ermöglichte. Ebenso war es mit dem eingesetzten Versuchsaufbau möglich, die Hubfrequenz zu variieren. Sie zeigten, dass die pulsierende Strömung einen geringeren Fouling-Widerstand zur Folge hat als eine rein stationäre Strömung. Die pulsierende Strömung erlaubte kein weiteres Kristallwachstum und entfernte diese kontinuierlich von der Oberfläche.

Gillham et al. [35] untersuchten zwei verschiedene Systeme zur Pulserzeugung: eine Balgeinheit und ein Kolbensystem. Jedoch war das Kolbensystem aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit die bessere Wahl für die Pulserzeugung. Mit der Methode konnte die Reinigungsrate um das 2,5 fache erhöht werden.

Bode et al. [49] benutzten die gleiche Apparatur wie Förster et al. [48], jedoch setzten sie als Verunreinigung BSA ein. Ihre Untersuchungen zeigten, dass die maximal angelegte Geschwindigkeit und die Welligkeit, also das Verhältnis zwischen der maximalen oszillierenden Geschwindigkeit und der mittleren Geschwindigkeit eines Pulses, die entscheidenden Faktoren für die Reinigungseffizienz sind. Je höher die maximale Amplitudengeschwindigkeit des Pulses ist, desto besser ist das Reinigungsergebnis. Der Welligkeit kam bei dieser Untersuchung jedoch eine noch größere Bedeutung zu. Bode zeigte, dass die Welligkeit das Reinigungsergebnis noch stärker als die maximale Geschwindigkeit beeinflusst. Eine Erhöhung der Welligkeit hat eine Verbesserung des Reinigungsergebnisses, unabhängig von der Geschwindigkeit, zur Folge.

Augustin [50] führte 2010 basierend auf den Untersuchungen von Bode Simulationen der pulsierenden Strömung in komplexen Rohrgeometrien, wie Rohraufweitungen und rechtwinklige Rohrbögen durch. Somit war es mithilfe der Wand Schubspannungsverteilung an der Rohrwand möglich, Vorhersagen über die Reinigungseffizienz zu treffen. Blel et al. [51, 52] untersuchten den Einfluss turbulenter, pulsierender Strömungen auf die Wandschubspannung in zylindrischen Rohrleitungen. Sie zeigten, dass die pulsierende Strömung eine Beschleunigung des Strömungsgradienten verursacht, der letztendlich für die bessere Reinigungsfähigkeit des Rohres verantwortlich ist. Für die Pulserzeugung wurden verschiedene Systeme benutzt. In den obengenannten Veröffentlichungen kamen Kolbenpumpen oder stationäre Pumpen mit einem angebauten Kolbensystem zum Einsatz [35, 49]. Ebenso erfolgte die Pulserzeugung im Bereich der Oberflächenreinigung auch mit Magnetventilen [51, 52].

2.3.3 Ablösemechanismen bei der Reinigung von Oberflächen

Um in den Reinigungsvorgang positiv eingreifen zu können, ist es wichtig, die Ablösemechanismen partikulärer Verunreinigungen von Oberflächen zu verstehen. Drei Arten von Ablösemechanismen sind in der Literatur bekannt: das sofortige Ablösen durch die direkte Auftriebskraft, das Ablösen durch Rollen der Partikel, und das Ablösen durch Gleiten der Partikel über die Oberfläche. Rubin [53] berechnete als einer der Ersten Widerstands- und Auftriebsbeiwerte von ruhenden kugelförmigen Partikeln in einer wandnahen laminaren Grenzschicht. Zur

Berechnung zog er experimentelle Messungen der Strömungskräfte heran. Er variierte dabei den Kugeldurchmesser zwischen 1 und 3 mm, die Strömungsgeschwindigkeit zwischen 0,1 und 35 cm/s und die Viskosität des strömenden Fluides zwischen 1 und 14 cm²/s.

Masironi et al. [54] waren die Ersten, die die Mechanismen der Partikelablösung mithilfe eines Mikroskops direkt (online) betrachteten. Sie beobachteten eine Kombination aus Partikelbewegung (Rollen und Gleiten) entlang der Oberfläche und sofortigem Partikelablösen (ohne Bewegung) normal zur Oberfläche.

Viele Messungen zeigten daneben auch, dass die Ablösung nicht augenblicklich, sondern innerhalb eines gewissen Zeitraumes abläuft (siehe beispielsweise [55]). Es wird angenommen, dass dieses Phänomen auf ein ungeordnetes Strömungsverhalten des Fluids nahe der Oberfläche zurückzuführen ist [56]. Dazu erfolgten quantitative Messungen von Kline et. al [57], die zeigten, dass innerhalb der laminaren Grenzschicht räumlich und zeitlich abhängige Strömungsbewegungen auftreten. Die Strömung wird ständig durch turbulente Stöße unterbrochen. Diese Stöße verursachen einen kurzzeitigen Anstieg der Auftriebskraft, was zur Partikelablösung führt. Cleaver und Yates [58] entwickelten ein Modell, mit dem die mögliche Auftriebskraft, die dabei auf ein Partikel wirkt, vorhergesagt werden kann.

Hubbe [59] stellte für die Ablösung kolloidaler Partikel von festen Oberflächen in der Scherströmung theoretische Modelle vor. Die Modelle beziehen sich hauptsächlich auf harte und runde Partikel, die klein genug sind, um in den Bereich der Brown'schen Bewegung zu fallen. Er hat gezeigt, dass die hydrodynamische Kraftkomponente, die parallel zur Wand wirkt, meistens um ein Vielfaches größer als die Auftriebskraft ist. Die verschiedenen Bewegungsarten der Partikel (Rollen, Gleiten und direktes Ablösen) lassen sich durch ihre Abhängigkeit von der Schubspannung unterscheiden. Reeks et al. [60] entwickelten eine neue Herangehensweise bei der Resuspendierung von Partikeln, die von einer festen Oberfläche in eine turbulente Strömung gelangen. Im Vergleich zu gängigen Kräftebilanz-Modellen berücksichtigt dieses Modell die turbulente Energie, die von der Strömung auf das Partikel übertragen wird. Der Ansatz hierbei ist, dass das Partikel von der Oberfläche abgelöst wird, sobald es eine ausreichend hohe Vibrationsenergie erfährt. Wen et al. [61] stellten in ihrer Arbeit ein Kinetikmodell zur Ablösung von Partikeln vor und verglichen es mit Daten aus der Industrie und durchgeführten Experimenten mit Partikeln im Größenbereich von 0,4 bis 1 µm. Wang [62] untersuchte mit einem theoretischen Ansatz die anfänglichen Bewegungsarten bei der Ablösung von Partikeln von Oberflächen. Dabei stellte

er fest, dass die Ablösung leichter durch Rollen als durch Gleiten oder durch direkte Partikelablösung erfolgt. Diese Ergebnisse waren bereits von Masironi et al. [54] experimentell gezeigt worden. Soltani et al. [63] entwickelte für die Partikelablösung zwei theoretische Modelle, die auf dem turbulenten Strömungsverhalten in Wandnähe basieren, eines für die Ablösung durch Rollen und das andere für die Ablösung durch Gleiten entlang der Oberfläche. Beide Modelle beinhalten die Strömungseffekte der Entstehung turbulenter Wirbel und Stöße, die die Partikelablösung begünstigen. Ibrahim et al. [64] untersuchten Partikelablösungen in turbulenten Luftströmungen, die durch Luftansaugen über einen Ventilator erfolgten. Sie beobachteten neben einer direkten Partikelablösung (normal zur Oberfläche, ohne Rollen) auch Partikelbewegungen (Rollen oder Gleiten) vor dem Ablösevorgang.

Zur Partikelablösung von Oberflächen unter An- bzw. Überströmung mit Flüssigkeiten gibt es ebenfalls einige Publikationen. Burdick et al. [65] zeigte, dass es möglich ist, wenn die Adhäsionskraft zwischen Partikel und Oberfläche und die angelegte mechanische Kraft während der Reinigung bekannt sind, den Ablösevorgang des Partikels vorherzusagen. Er benutzte als Modellsystem polydisperse Polystyrolpartikel, die auf einer Quarz-Oberfläche hafteten und setzte die Haftpartner einer laminaren Querströmung in einer wässrigen Lösung aus. Für das Modell benutzte er eine kritische Partikel-Reynolds-Zahl, um das Kraftkriterium für die Partikelablösung zu definieren.

Alle bisher aufgeführten Literaturstellen untersuchten die Reinigung jedoch nur an einfachen Geometrien (überströmte Platte, Rohrleitungen). Erst Stahl [66] befasste sich 2013 mit der Reinigung komplexer Strukturen (in diesem Fall gewobene Metallstützgewebe). Er untersuchte Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5-1 m/s und einen Zeitbereich zwischen 10 und 30 s. Er betrachtete dabei jedoch nicht die genauen Ablösemechanismen, weshalb es notwendig ist, diese im Rahmen dieser Arbeit genauer zu untersuchen und aufzuklären.

2.4 Pulsierende Reinigung von Membranen

Zur Reinigung von Membranen gibt es bereits viele Publikationen, die sich mit der pulsierenden Reinigung (in den Veröffentlichungen als „Backpulsing“ bezeichnet) beschäftigen. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten liegt auf einer Regenerierung des Filtratflusses, der durch Bildung einer Foulingsschicht auf der Membran nach einer gewissen Filtrationszeit vermindert wird, und nicht auf dem gereinigten Filtermedium. Jedoch geben diese Arbeiten eine Anregung zur Realisierung der pulsierenden Reinigung. Im Folgenden soll nun ein kurzer Überblick über die betrachteten Veröffentlichungen gegeben werden.

Beim „Backpulsing“ wird während des Filtrationsprozesses durch Umkehren des transmembranen Druckgefälles periodisch hochfrequent rückgespült. Dabei wird das Filtrat in umgekehrter Richtung durch das Filter gedrückt und hebt dadurch die Fouling-Schicht von der Membran ab. Rodgers und Sparks [11] untersuchten diese Methode für eine Eiweiß- und Gammaglobuline-Lösung auf einer Cellulose-Membran mit einer nominellen Porenweite von 1000 kDa. Sie fanden heraus, dass der Filtratfluss mit Pulsation um 2 Größenordnungen höher war als ohne Backpulsing. Sie untersuchten in einer weiteren Publikation [67] diesen Sachverhalt mit einer anderen Modellverunreinigung. Dabei führten sie die Mikrofiltration einer BSA-NaCl Puffer-Lösung mit einer Cellulose-Membran durch. Die transmembranen Drücke lagen bei Versuchsdurchführung ohne Backpulsing zwischen 0,75 und 1,4 bar und mit Backpulsing waren die Drücke um 0,05–0,3 bar höher. Die Backpulse-Versuche erfolgten bei Frequenzen von 0,2–5 Hz. Sie stellten fest, dass sich der Filtratfluss beim Backpulsing erst ab einem bestimmten Druck gegenüber der Versuchsdurchführung ohne Backpulsing erhöhte. Rodgers und Sparks gingen davon aus, dass der Anstieg des Filtratflusses an Vibrationen der Membran, hervorgerufen durch die Pulsation, liege. Redkar und Davis [68] untersuchten die Mikrofiltration von Hefe mit Backpulsing. Sie zeigten, dass die Höhe des Puls-Drucks mit dem Filtratfluss zunimmt. Ebenso stellten sie fest, dass mit Verringerung der Pulsdauer der Filtratfluss zunimmt. Parnham und Davis [69] fanden bei der Mikrofiltration von Bakterienzellsätsen die optimalen Backpulse-Bedingungen. Sie lagen bei einer Backpulse-Dauer von 0,09 s und einer Frequenz von 2,5 Hz. Auch Kuberkar et al. [70] versuchten während der Mikrofiltration von Bakterien, den Filtratfluss wieder zu erhöhen. Sie zeigten, dass bei hoch verdünnten Suspensionen eine Erhöhung auf das 12,5 fache möglich ist. Fermentationsbrühen mit höheren Konzentrationen erreichen dagegen mit Backpulsing nur die 2 fache Filtratfluss-Erhöhung, da sich mehr extrazelluläre Bestandteile in der Lösung befinden, die eine irreversible

Foulingsschicht bilden und höhere Adhäsionskräfte aufweisen. Die besten Ergebnisse konnten hier mit der niedrigsten Puls-Dauer von 0,1 s erzielt werden. Ramirez und Davis [71] untersuchten die Mikrofiltration mit hochfrequentem Backpulsing für Anwendungen im Bereich der Abwasserbehandlung. Sie zeigten, dass Backpulsfrequenzen von über 1 Hz aufgrund des ansteigenden Permeatverlustes während den Pulsen kontraproduktiv sind und dass bei Frequenzen kleiner als 0,1 Hz der Permeatfluss vermindert ist, da sich bei zu langen Filtrationszyklen die Fouling-Schicht wieder ausbilden kann. Auch sie zeigten Permeat-Fluss-Erhöhungen zwischen dem drei- und zehnfachen. In einer weiteren Publikation [72] erwies sich die Kombination aus Oberflächenmodifizierung einer Polypropylen-Membran und frequentem Backpulsing als zielführend. Filtriert wurde hierbei eine *E.coli*-Suspension. Ohne Backpulsing konnte kein Unterschied im Filtratfluss der einzelnen modifizierten Membranen erkannt werden. Die Kombination aus modifizierter Membran und Backpulsing zeigte jedoch einen um das 1,7- bis 2,6-fach höheren Permeatfluss. Der Effekt der Oberflächenmodifikation nimmt jedoch mit steigender *E.coli*-Konzentration ab. Sie nahmen an, dass das Ablagern der Foulingsschicht bei hohen Konzentrationen der dominierende Faktor ist und dass die Membran-eigenschaften hier einen geringeren Einfluss haben. Andere Arbeiten [73, 74] beschäftigten sich mit der Reinigung keramischer Membranen unterschiedlicher Porenradien (0,2 - 5 μm). Bei diesen Untersuchungen erfolgte die Querstromfiltration einer $\text{Cr}(\text{OH})_3$ Suspension und die Filtereinheit war mit einer Backpulse-Anlage ausgestattet. Auch bei diesen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die Filtration mit Backpulsing viel effektiver als ohne Backpulsing ist, der Permeat-Fluss stieg bis auf den 5-fachen Wert an. Auf Basis der Modelle von Redkar et al. [75], Kuberkar et al. [70] und Mores et al. [76] zur Berechnung des gesamten Permeatflusses während der Mikrofiltration mit Backpulsing, entwickelte Héran und Elmaleh [77] ein Modell, das den Permeatfluss genauer beschreibt.

2.5 Anwendungen der Reinigung im Bereich Filtration

Dieser Abschnitt soll den bisherigen Stand der Technik der Reinigung anhand von fünf verschiedenen Filtertypen etwas genauer darstellen. Neben zwei Verfahren zur Zentrifugalfiltration (Stülpfilterzentrifuge, Schälzentrifuge) wird noch ein kontinuierliches Filtrationsverfahren mit Vakuum bzw. Gasdifferenzdruck (Bandfilter) und ein diskontinuierliches Verfahren (Filterpresse), bei dem die Entfeuchtung über mechanischen Druck erfolgt, vorgestellt. Ein weiterer Filtertyp ist das Kantenspaltfilter, das vor allem in der Klärfiltration zum Einsatz kommt. Bei allen Filtertypen steht die Durchführung der Filtertuch- bzw. Filterelement-Reinigung im Vordergrund. Da bei den vier erstgenannten Filtertypen häufig Polymergewebe und bei dem letztgenannten Spaltelemente aus Metall zum Einsatz kommen, werden die kritischen Reinigungsstellen dieser Filtermedien abschließend in Abschnitt 2.5.7 näher beleuchtet.

2.5.1 Stülpfilterzentrifuge

Im Folgenden sind die einzelnen Verfahrensschritte der Stülpfilterzentrifuge dargestellt (Abbildung 2-2). Interessant für die Reinigung ist vor allem Verfahrensschritt (5).

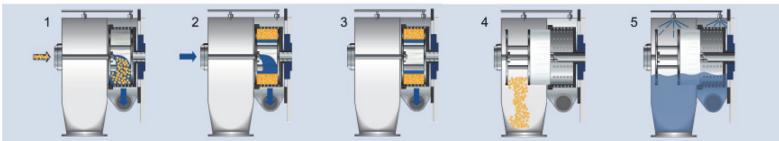


Abbildung 2-2: Verfahrensabläufe bei der Stülpfilterzentrifuge, (1) Befüllen der Trommel mit Suspension, (2) Waschen des Filterkuchens, (3) Entfeuchtung, (4) Kuchenauswurf durch Umstülpen des Tuches, (5) Reinigung (Werksbild Firma Heinkel)

Stülpfilterzentrifugen haben den Vorteil, dass der Kuchen durch Umstülpen des Filtertuches bei rotierender Trommel ausgetragen wird. Verfahrensraum und Maschinenraum sind voneinander getrennt, weshalb sie für einen Einsatz in der Pharmazie vorteilhaft sind. Problemstellen der Reinigung befinden sich an der Filtertuchbefestigung und am Filtermedium selbst [2]. Bei der Reinigung sind verschiedene Düsen (eine über der Trommel, eine über dem Austragsgehäuse und eine hinter der Trommel, siehe Abbildung 2-2 (5)) angebracht. Dies ermöglicht eine Optimierung des Reinigungsprozesses, jedoch kann für das Filtermedium nicht von einer zufriedenstellenden Reinigung gesprochen werden, denn

auch hier werden die Strömungsschatten nicht erreicht. Stahl et al. [78] zeigten, dass eine optimale Reinigung durch Rückspülen des Filtermediums (nach dem Umstülpvorgang) von hinten, das heißt entgegen der Filtrationsrichtung, erfolgt. Dafür sind jedoch hohe Volumina an Reinigungsfluid notwendig. Eine Idee zur Minimierung der Reinigungsfluidmengen wäre ein Düsenstrang, der an der Welle angebracht ist. Nach dem Umstülpvorgang könnte somit bei drehender Trommel das komplette Filtermedium gereinigt werden.

2.5.2 Schälzentrifugen

In Abbildung 2-3 ist das Schema einer Schälzentrifuge dargestellt.

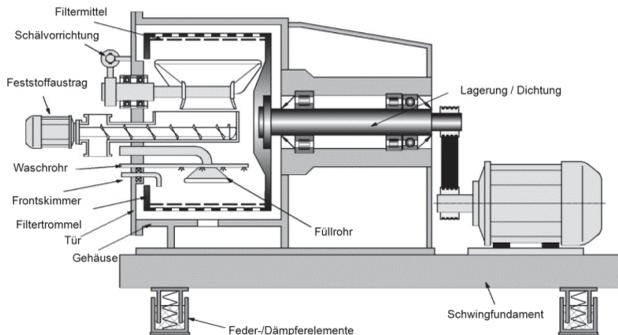


Abbildung 2-3: Schema Schälzentrifuge [79]

Hier erfolgt die Reinigung über das Waschrohr. An ihm sitzen Düsen, die das Filtertuch auf der Kuchenenseite reinigen können. Eine Reinigung der kuchenabgewandten Seite ist nicht direkt möglich, da das Filtertuch auf der Trommel eingespannt ist. Das Trommelgehäuse besitzt zwar Bohrungen, damit das Filtrat ablaufen kann, aber die Bohrungen sind zu klein, um mithilfe von Düsen an das Filtermedium zu gelangen. Die Reinigung des Gehäuses erfolgt meistens durch Düsen von außen, die direkt vor der Trommel angebracht sind.

2.5.3 Bandfilter

In Abbildung 2-4 ist der Aufbau (a) und die einzelnen Verfahrensschritte (b) eines Taktbandfilters der Firma BHS dargestellt. Der vierte Verfahrensschritt (Abbildung 2-4 b) beschreibt die Tuchreinigung, die nach dem Kuchenabwurf erfolgt. Bei diesem Modell der Firma BHS (Sonthofen) wurde dazu eine eigene Waschkammer konstruiert, in der die Reinigung stattfindet. In der Reinigungs-

kammer sind Düsenstränge angebracht, die das Tuch von oben (Kuchenseite) und unten (Filtratseite) reinigen können.

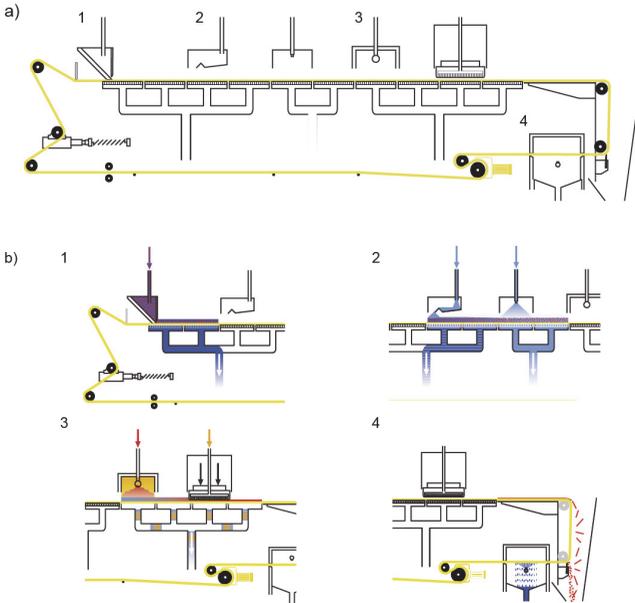


Abbildung 2-4: Aufbau und Prozessschritte eines Taktbandfilters der Firma BHS, 1) Suspensionsaufgabe und Kuchenbildung; 2) Kuchenwäsche; 3) Trocknen; 4) Kuchenabwurf und Tuchreinigung ([80])

Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 2-4 nur die Düsenleiste für die Reinigung der Kuchenseite dargestellt. Die Tücher sind nicht fest eingespannt, sondern laufen über Rollen, deshalb ist Maximaldruck, der für die Reinigung eingesetzt werden kann, begrenzt. Die Düsen sind 5–10 cm vom Filtertuch entfernt angebracht.

2.5.4 Filterpresse

Bei Rahmenfilterpressen sind mehrere Platten planparallel angeordnet, die durch eine Anpressvorrichtung aneinander gepresst werden. Als Filtermedien, sie sind zwischen den einzelnen Filterplatten angebracht, können Gewebe und Vliese eingesetzt werden. In den Filterplatten sind Ablaufkanäle, durch die Filtrat ablaufen kann, nachdem es durch das Filtermedium gepresst wurde. Neben dem Filtermedium selbst können hier die Abdichtungen zwischen den Filterele-

menten und Einfassungen zu hygienischen Problemen führen. Während es, wie bereits erwähnt, Richtlinien und Erfahrungen zur Gestaltung hygienischer Abdichtungen gibt, ist zu Filtermedien und ihrem Reinigungsverhalten bisher recht wenig untersucht. Für das Reinigen der Filtertücher bei den Filterpressen werden Filtertuchwaschanlagen eingesetzt, die eine vollautomatisierte Abspritzeinheit besitzen. Die Anlagen können Drücke bis zu 100 bar zum Abspritzen einsetzen. Durch automatisches Abfahren der Filterplatten können 100 Kammern in ca. 1,5 h gereinigt werden. Jedoch können auch hier die Toträume in den Filtermedien nicht oder nur schlecht erreicht werden [27].

2.5.5 Kantenspaltfilter

Kantenspaltfilter gehören zur Gruppe der Klärfilter. Sie werden angewandt, um vorwiegend feste Verunreinigungen aus einer Flüssigkeit oder Emulsion zu entfernen, damit diese erneut verwendet werden können. Die am Filter abgeschiedenen Partikel können keinen Filterkuchen mit hinreichender Permeabilität, Dicke und Festigkeit aufbauen. In Abbildung 2-5 a) ist der schematische Aufbau eines Kantenspaltfilters dargestellt.

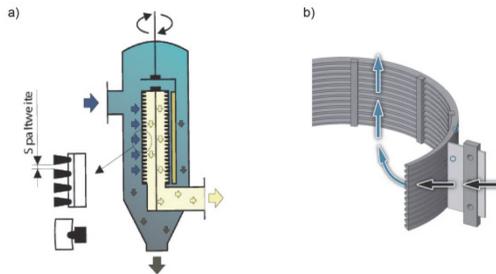


Abbildung 2-5: Kantenspaltfilter, a) Funktionsweise [81]; b) Funktionsweise des Schabers, um Verunreinigung zu entfernen [82]

Bei der Filtration strömt die Flüssigkeit in der Regel von außen nach innen durch das Filtermaterial. Die Abscheidung des Feststoffs erfolgt auf und in dem Filtermaterial. Kantenspaltfilter weisen definierte spaltförmige Kanäle für die Filtratströmung auf, die sich in Hauptströmungsrichtung keilförmig erweitern. Die minimale Trenngrenze beträgt $20\ \mu\text{m}$. Die Feststoffpartikel sammeln sich auf der Außenseite des Filterkorbs und werden durch einen ständig rotierenden Schaber (siehe Abbildung 2-5 b) laufend entfernt, so dass der Druckabfall minimal bleibt. Es gibt jedoch auch Ausführungen, bei denen der Filterkorb rotiert

und die Schabervorrichtung feststeht. Anwendungen sind auch in der Lebensmittelindustrie zu finden (Schokoladenmasse, Emulsionen, Fruchtsäfte) [83]. Mithilfe des Schabers ist es möglich, das Filterelement von außen zu reinigen, jedoch ist eine Reinigung von innen bisher nur durch Rückspülung möglich. Durch Einsatz einer Düsenleiste im Innern des Filterkorbes könnte eine Reinigung des Filterelementes während der Rotation des Filterkorbes möglich werden. Somit könnten eventuell auch schwer reinigbare Stellen erreicht werden.

2.5.6 Übertragbarkeit der Untersuchungen auf die industrielle Anwendbarkeit

Für die Untersuchungen zur Erhöhung der Reinigungseffizienz wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl die reine Rückströmung, die bei der Stülpfilterzentrifuge und der Schälzentrifuge zum Einsatz kommt, als auch eine pulsierende Reinigung über Düsen, untersucht. Die Reinigung erfolgt bei beiden Verfahren (pulsierend und kontinuierlich) von der kuchenabgewandten Seite aus, wie es beispielsweise bei der Stülpfilterzentrifuge und dem Bandfilter möglich ist. Untersuchungen zur Reinigung der Kuchenseite waren nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.5.7 Hygienerisiken von Filterelementen

Wie bei den bisherigen Schilderungen deutlich wurde, kommt dem Filtermedium bei diesen Prozessen eine besondere Bedeutung zu. Es ist dazu da, den Feststoff (Partikel, Mikroorganismen, Moleküle) auf der Oberfläche oder im Inneren des Filtermediums abzuscheiden. Es ist einleuchtend, dass aufgrund der offenerporenen Struktur der Filtermedien diese nur schwer zu reinigen sind. Ebenso kann auf deren Gestaltung auch nur schwer Einfluss genommen werden. In Abbildung 2-6 sind verschiedene Filtermedien und ihre Problemstellen bezüglich der Reinigung dargestellt.

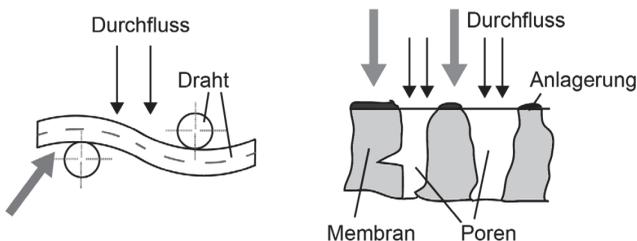


Abbildung 2-6: Hygienische Problemstellen von Filtermedien, links: Gewebe mit Spalte, rechts: Membran mit Restbelag nach der Rückspülung [27]

Die linke Zeichnung stellt ein Quadratmaschengewebe schematisch dar. Eingezeichnet sind hier die Spalte, die durch die grundlegende Struktur des Gewebes entstehen und somit nicht zu vermeiden sind. Die Größe der Spalte wird von der Drahtstärke stark beeinflusst. Je dicker die Fäden, desto größer ist die undurchlässige Fläche und desto mehr steigt das Hygienerisiko. Die rechte Zeichnung zeigt eine Membran nach der Rückspülung. Es ist ersichtlich, dass der Schmutz, der sich auf den undurchlässigen Stellen angelagert hat (graue Pfeile), nur schwer von der Strömung (schwarze Pfeile) erreicht werden kann. Erschwert wird die Reinigung noch dadurch, dass mikrobielle Rückstände an den undurchlässigen Stellen anwachsen können.

Stahl et al. [2, 66] und Rieger et al. [84] führten Strömungssimulationen durch gewebte Strukturen durch. Sie betrachteten dabei offenporige Quadratmaschengewebe mit Maschenweiten zwischen 400 und 800 μm und Drahtdurchmesser zwischen 250 und 400 μm . In Abbildung 2-7 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsergebnisse dargestellt.

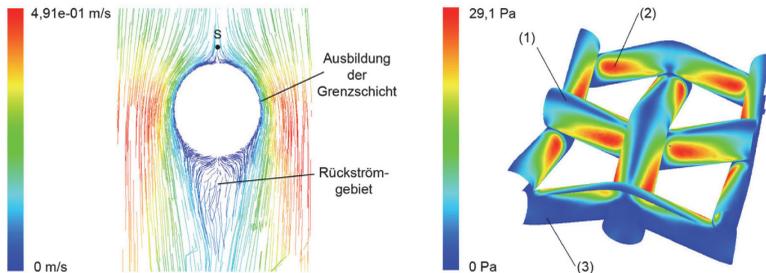


Abbildung 2-7: CFD-Simulation der Filterdurchströmung eines Quadratmaschengewebes (Plain weave), links: Stromlinien in der Schnittebene durch eine Pore; rechts: Wandschubspannung an der Filteroberfläche; Strömung jeweils von oben nach unten [66]

Das linke Diagramm beschreibt die Stromlinien in der Schnittebene durch eine Pore. Es ist bei einer Durchströmung von oben nach unten zu erkennen, dass sich auf der Strömungszugewandten Seite ähnlich wie bei einer Zylinderumströmung ein Staupunkt ausbildet, an dem nur sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. Entlang der Filterdrahtoberfläche in Strömungsrichtung ist die Ausbildung einer Grenzschicht zu beobachten, die sich hinter dem maximalen Drahtdurchmesser wieder vom Draht ablöst. Hier bildet sich ein Rückströmgebiet aus. Im rechten Diagramm sind die zugehörigen Wandschubspannungsverteilungen dargestellt. Auf der Oberseite des Gewebes (1)

direkt am Staupunkt treten nur sehr geringe Wandschubspannungen auf. Jedoch ist auch ein Gebiet vorhanden (2), an dem recht hohe Wandschubspannungen zu beobachten sind. An der Unterseite des Gewebes (3), im Rückströmgebiet sind wiederum nur sehr geringe Wandschubspannungen zu beobachten. Genau die Stellen, an denen nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten bzw. geringe Wandschubspannungen zu erkennen sind, sind auch die kritischen Reinigungsstellen. Es kann hier mitunter passieren, dass die Strömungskräfte an diesen Stellen nicht ausreichen, um die Restverunreinigung vom Gewebe abzulösen.

Weitere Reinigungsprobleme können an den Einfassungen der Filtermedien oder an den Auflageflächen am Stützmaterial auftreten. Da Stützgewebe erheblich dicker sind, das Kunststoffgewebe verstärken und die Steifigkeit erhöhen, steigt die Anzahl der undurchlässigen Stellen, die Hohlräume, Toträume und Spalte zur Folge haben und die nur schwer oder gar nicht zu reinigen sind. Um das Hygienierisiko an den Einfassungen der Filtermedien zu verringern, werden die vorhandenen Spalte mit Lot- oder Kunststoffmaterialien vergossen. Auch die Stellen, an denen die Filtermittel in den Gehäusen oder Rahmen der Filterapparate befestigt sind, können hygienerelevante Reinigungsprobleme aufweisen. Neben gewebten Strukturen kommen in industriellen Anwendungen jedoch auch häufig Spaltfilterelemente zum Einsatz, deren Aufbau in Abbildung 2-8 dargestellt ist.

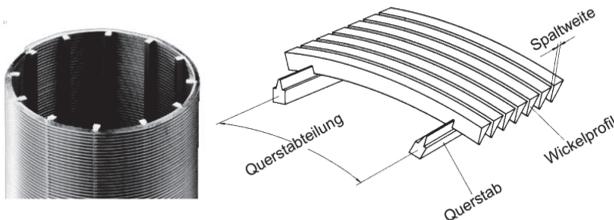


Abbildung 2-8: Spaltfilterelemente, links: komplettes Filterelement, rechts: schematischer Aufbau [85]

Beim Herstellungsprozess werden die keilförmigen Profile um die Querstäbe gewickelt und dann verschweißt. Strömungsschatten und undurchlässige Stellen sind an den Schweißstellen zwischen Profil und Querstab erkennbar. Partikel können sich insbesondere an der Oberseite des Spaltes aber auch zwischen Spaltelement und Auflageelement (Querstab) verklemmen bzw. anlagern. Die Auflageelemente nehmen hierbei durchaus ein Volumen von 5-10 % der Filter-

fläche ein. In Abbildung 2-9 ist die Anlagerung in den Spaltelementen schematisch dargestellt.

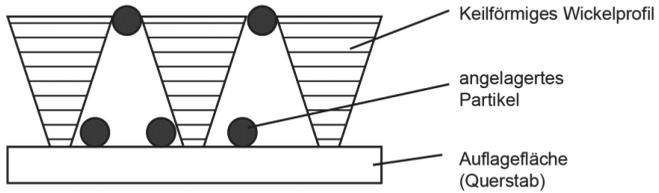


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der Partikelanlagerung an einem Kantenspalfilter

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Haftkraft

Die Kraft, die der Reinigung von Oberflächen am Stärksten entgegenwirkt, ist die Haftkraft. Für die Haftung oder Anlagerung von Partikeln auf Oberflächen in flüssiger Umgebung spielen neben Van-der-Waals-Kräften auch die elektrostatischen Kräfte eine wichtige Rolle.

3.1.1 Van-der-Waals Kräfte

Die Van der Waals Wechselwirkung liegt in intermolekularen Anziehungskräften zwischen einzelnen Atomen oder Molekülen begründet. Dabei gibt es drei verschiedene Arten von Wechselwirkungen: die Debye-Wechselwirkung, die die Potential zwischen einem permanenten und einem induzierten Dipol beschreibt, die Keesom-Wechselwirkung zwischen zwei permanenten Dipolen und zuletzt die London-Wechselwirkung zwischen zwei induzierten Dipolen. Nach Hamaker hat die London-Kraft den größten Einfluss auf die Van-der-Waals Wechselwirkung. Deshalb wird sie auch als Van-der-Waals-Kraft bezeichnet. Zur Berechnung dieser Größe gibt es zwei Ansätze: den makroskopischen Ansatz nach Lifshitz und die mikroskopische Theorie nach Hamaker. Hamaker [86] betrachtete bei seinem Ansatz vor allem Wechselwirkungen zwischen einem einzelnen Atom bzw. Molekül eines Mediums und einem Atom (bzw. Molekül) eines anderen Mediums und summierte danach alle Atompaare auf. Für die Anziehung zwischen einem Partikel und einer ebenen Oberfläche (Kugel-Platte-Modell) ergab sich Gleichung 3-1:

$$W_{KP} = -\frac{H \cdot d}{12 \cdot a} \quad (\text{Kugel-Platte-Modell}). \quad 3-1$$

Hierbei ist H die Hamakerkonstante, d der Durchmesser des Partikels und a beschreibt den Abstand zwischen Partikel und Oberfläche. Ähnlich ergibt sich aus der Theorie nach Hamaker die Anziehungsenergie zwischen zwei ebenen Oberflächen (Platte-Platte-Modell: Gleichung 3-2) und zwischen zwei Partikeln (Kugel-Kugel-Modell: Gleichung 3-3):

$$W_{PP} = -\frac{H}{12 \cdot a^2} \quad (\text{Platte-Platte-Modell}), \quad 3-2$$

$$W_{KK} = \frac{H \cdot R_1 \cdot R_2}{6 \cdot a \cdot (R_1 + R_2)} \quad (\text{Kugel-Kugel-Modell}). \quad 3-3$$

R_1 bzw. R_2 stellen die Radien des Kugel-Kugel-Modells dar. Er verwendete dabei die Hamakerkonstante A , die hauptsächlich von der Dichte der Atome und der London-van-der-Waals-Konstanten abhängig ist (Gleichung 3-4):

$$H = \pi \cdot C \cdot \rho^2. \quad 3-4$$

C ist die London-Van-der-Waals-Konstante und ρ die Dichte der Atome. Zur Berechnung der London-van-der-Waals-Konstante ist es notwendig, die Polarisierbarkeit der Atome und bestimmte Atompotentiale zu kennen. Jedoch ist die Polarisierbarkeit nur für wenige Atome bekannt und schwer bestimmbar. Deshalb wird die Hamakerkonstante oft über die Oberflächenenergie eines Stoffes bestimmt [87]. Die Oberflächenenergie W_{132} ist proportional zur Oberflächenspannung γ (siehe Gleichung 3-5 und 3-6):

$$W_{132} = 2 \cdot \gamma_{132}, \quad 3-5$$

mit

$$W_{132} = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12}. \quad 3-6$$

Feststoff 1 und 2 ist dabei von einem Fluid 3 umgeben. Die Grenzflächenspannungen können mithilfe der Kontaktwinkelmessmethode nach Owens [88] und Rabel [89] bestimmt werden. Mit Gleichung 3-1 und 3-5 ergibt sich für die Hamakerkonstante A bei Haftung eines Partikels auf einer ebenen Oberfläche (Kugel-Platte-Modell):

$$H_{132} = \frac{24 \cdot \gamma_{123} \cdot a}{d}, \quad 3-7$$

Lifshitz [90] dagegen entwickelte eine Theorie, bei der er die atomare Struktur vernachlässigte und nur messbare Feststoffeigenschaften wie beispielsweise die Dielektrizitätskonstante betrachtete. Dabei werden die beiden zu haftenden Körper als unendlich ausgedehnte Halbräume betrachtet. Sie sind lediglich durch eine Vakuumschicht voneinander getrennt. Mithilfe des Maxwell'schen Spannungstensor erhielt Lifshitz die Van-der-Waals-Kraft. Die Wechselwirkungsenergie lässt sich für die drei Modelle wie folgt (Gleichung 3-8 bis 3-10) berechnen:

$$W_{KP} = -\frac{h \cdot \omega \cdot d}{16 \cdot \pi \cdot a} \quad (\text{Kugel-Platte-Modell}), \quad 3-8$$

$$W_{PP} = -\frac{h \cdot \omega}{16 \cdot \pi \cdot a^2} \quad (\text{Platte-Patte-Modell}), \quad 3-9$$

$$W_{KK} = \frac{h \cdot \omega \cdot R_1 \cdot R_2}{8 \cdot a \cdot (R_1 + R_2)} \quad (\text{Kugel-Kugel-Modell}). \quad 3-10$$

Hierbei ist h das Plancksche Wirkungsquantum und ω die Frequenz. Zwischen der Hamakerkonstante A und der Van-der-Waals-Konstante $h \cdot \omega$ besteht folgender Zusammenhang (Gleichung 3-11):

$$h \cdot \omega = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot A. \quad 3-11$$

3.1.2 Elektrostatische Kraft

Bei der Reinigung von Oberflächen spielt die elektrostatische Kraft zwischen Verschmutzung und Oberfläche auch in wässrigen Medien eine wichtige Rolle. Zwischen geladenen Partikeln und geladenen Oberflächen kann es je nach Ladung der beiden Oberflächen zur Anziehung (Oberflächen sind entgegengesetzt geladen) oder Abstoßung (Oberflächen tragen Ladungen gleichen Vorzeichens) kommen. Das kann natürlich die Haftkraft stark beeinflussen.

Im Folgenden wird auf den Aufbau der elektrochemischen Doppelschicht für ein negativ geladenes Teilchen in einer elektrolythaltigen Lösung eingegangen.

3.1.2.1 Elektrochemische Doppelschicht

Die Modelle zur elektrochemischen Doppelschicht nach Gouy [91, 92], Chapman [93] und Helmholtz [94] beschreiben die real vorherrschenden Verhältnisse

eines Partikels in einem elektrolythaltigen Wasser nur unzureichend. Erst Stern [95] entwickelte durch Zusammenführen der drei Theorien die allgemein gültige Modellvorstellung. Im Folgenden ist das Modell an einem negativ geladenen Partikel näher erläutert (Abbildung 3-1 links). Es ist ersichtlich, dass unmittelbar an der negativ geladenen Partikeloberfläche negativ geladene Ionen relativ geordnet adsorbieren (innere Helmholtz-Schicht). Die Adsorption der negativen Ionen auf einer negativen Oberfläche (was aus elektrostatischen Überlegungen widersinnig erscheint) kann durch Heranziehen der Van-der-Waals-Anziehung erklärt werden. Aufgrund einer weniger stark ausgebildeten Hydrathülle als bei positiven Ionen, sind negative Ionen weniger gut abgeschirmt, wodurch die Van-der-Waals-Kraft eher zwischen negativen Ionen und negativer Oberfläche als zwischen positiven Ionen und negativer Oberfläche auftritt. Die Anionen verlieren aufgrund der hohen Bindungskräfte ihre Hydrathülle und adsorbieren an die Oberfläche. Um die nun negative Ladung des Partikels kompensieren zu können, wird eine Monoschicht aus Kationen von der Partikeloberfläche angezogen. Diese adsorbieren an der Oberfläche aufgrund elektrostatischer Anziehung und Van-der-Waals Kräften (Van-der-Waals-Kräfte sind jedoch wegen des größeren Abstandes geringer ausgeprägt), verlieren dabei aber ihre Hydrathülle nicht. Da die Monoschicht aus Kationen immer noch nicht ausreicht, um die komplette Ladung des Partikels zu kompensieren, werden weitere Kationen von der Partikeloberfläche angezogen. Diese adsorbieren jedoch nicht an der Oberfläche, sondern sind diffus um das Partikel verteilt. Diese Schicht wird als Gouy-Chapman-Schicht bezeichnet. Mit dieser Modellvorstellung ist auch der allmähliche Konzentrationsanstieg der Kationen mit sinkendem Abstand zur Partikeloberfläche erklärbar. Im rechten Diagramm (Abbildung 3-1) ist der Potentialverlauf in den einzelnen Schichten dargestellt.

In der inneren Helmholtz-Schicht erreicht das Potential aufgrund der adsorbierten Ionen ein Maximum. Das Maximum ist aufgrund des Platzbedarfs der negativen Ionen begrenzt. In der äußeren Helmholtz-Schicht ist keine vollständige Kompensation der negativen Ladung möglich, weshalb das Potential auf einen bestimmten Wert abfällt. Das liegt auch am größeren Platzbedarf der positiv geladenen Ionen.

Es ist ersichtlich, dass in der diffusiven Gouy-Chapman-Schicht das Potential exponentiell abnimmt. Das rührt von der unregelmäßigen Ionenverteilung innerhalb dieser Schicht her. Die Konzentration an positiven Ionen nimmt mit steigendem Abstand von der Partikeloberfläche ab bis schließlich am Ende der diffusiven Schicht die Anzahl an positiven und negativen Ionen gleich ist, das Potential also den Wert null annimmt.

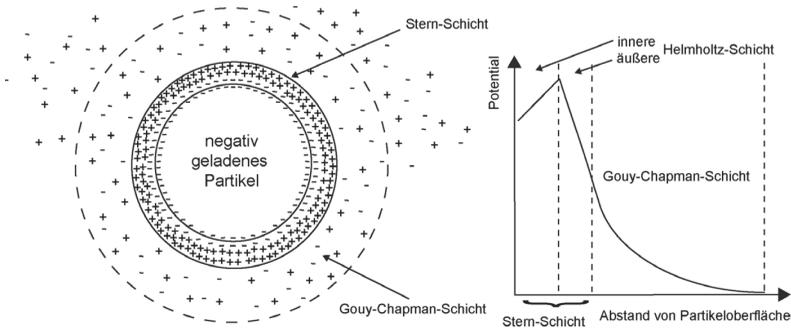


Abbildung 3-1: Elektrochemische Doppelschicht um ein geladenes Teilchen in einer Flüssigkeit nach Riddick [96]

Die Dicke der diffusiven Schicht ist stark abhängig von der Elektrolytkonzentration. Dabei nimmt die Dicke mit steigendem Elektrolytgehalt in der Lösung ab. Je kleiner die Schichtdicke ist, desto kleiner wird auch der Absolutwert des gemessenen Zetapotentials. Die Schichtdicke der diffusiven Schicht ist theoretisch unendlich lang, sie wird jedoch definitionsgemäß auf den Bereich begrenzt, bei dem das Potential auf den Faktor e^{-1} abfällt. Diese Dicke wird in der Theorie auch Debye-Länge δ genannt.

Nähern sich zwei Oberflächen einander an, überlappen sich ab einem bestimmten Abstand die beiden Doppelschichten. Das dabei entstehende Abstoßungspotential für ein Kugel-Platte-Modell setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$E_{el} = 64 \cdot \delta \cdot k \cdot T \cdot j \cdot e^{-\frac{b}{\delta}} \cdot \tanh\left(\frac{z_1 e \xi_1}{k \cdot T}\right) \cdot \tanh\left(\frac{z_2 e \xi_2}{k \cdot T}\right). \quad 3-12$$

Hierbei ist δ die Debye-Länge, k die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur, j die Ionenkonzentration, b der Abstand der beiden Oberflächen, z_i die Wertigkeit der Ionen in der Lösung, e ihre Elementarladung und ξ das Zetapotential der jeweiligen Oberfläche (Index 1 bzw. 2).

3.1.2.2 Zetapotential

Bei der Diffusionsbewegung eines Teilchens bewirken die Reibungskräfte ein teilweises Abstreifen der diffusiven Schicht. Dadurch ist die Ladungskompensation des Teilchens nicht mehr gewährleistet, es ist nicht mehr neutral, sondern erfährt ein negatives Potential. Dieses Potential wird als Zetapotential bezeichnet.

net. Obwohl nicht die komplette diffusive Schicht abgestreift wird, ist es in der Praxis oft mit dem Sternpotential gleichzusetzen, da die Unterschiede nur geringfügig sind.

3.1.2.3 Isoelektrischer Punkt

Wie bereits erwähnt, hängt der Aufbau der elektrostatischen Doppelschicht und somit der Debey-Länge stark von der Ionenkonzentration in der umgebenden Lösung ab. Das bedeutet somit auch eine Abhängigkeit des Zetapotentials vom pH-Wert. Je nach pH-Wert ergeben sich unterschiedlich große Potentiale mit positivem oder negativem Vorzeichen. Den Punkt, an dem das Zetapotential den Wert null annimmt, wird isoelektrischer Punkt genannt.

3.1.2.4 Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Partikel

Die Wechselwirkung zwischen Oberfläche (könnte beispielsweise ein Filtermedium sein) und Partikelsystem hängt stark von der Oberflächenladung ab. Tragen sowohl Substrat- als auch Partikeloberfläche die gleiche Ladung, bzw. weisen die Zetapotentiale gleiche Vorzeichen auf, führt das zu einer Vergrößerung des Abstandes zwischen Partikel und Oberfläche durch die elektrostatische Abstoßung und somit gleichzeitig zu einer Reduzierung der van-der-Waals-Anziehung. Ungleichnamige Ladung von Oberfläche und Partikel (Zetapotential von Oberfläche und Partikeln haben unterschiedliche Vorzeichen) bewirken, dass Partikel und Substrat sich anziehen und somit ihren Abstand voneinander verringern. Dies wiederum hat eine Erhöhung der Van-der-Waals-Anziehung zur Folge. Beeinflussbar ist das jeweilige Zetapotential durch Elektrolytgehalt bzw. durch den pH-Wert der umgebenden Flüssigkeit. Dies erklärt auch die verbesserte Reinigungswirkung von Säuren und Laugen.

3.2 Grundlagen Strömung

Im nun folgenden Abschnitt werden die strömungsmechanischen Grundlagen einer reibungsbehafteten, inkompressiblen Strömung etwas genauer beschrieben. Gegenstand dieser Ausarbeitung ist die Charakterisierung der auftretenden Strömungen.

3.2.1 Strömungscharakterisierung

Die Charakterisierung der Strömung erfolgt hierbei mit der Viskosität, die das Fluidverhalten der Strömung beschreibt, und der Reynolds-Zahl, mit der ein Vergleich verschiedener Strömungsarten möglich ist.

3.2.1.1 Viskosität

Entscheidend für das Fluidverhalten ist die Viskosität eines Fluids. Die Viskosität kann an einem recht einfachen Versuch erklärt werden. Dabei werden zwei parallele ebene Platten, zwischen denen sich eine Flüssigkeit befindet, im Abstand h zueinander betrachtet. Die untere Platte ist in Ruhe und die obere Platte bewegt sich in ihrer Ebene mit einer konstanten Geschwindigkeit V . Aufgrund der Haftung der Schichten an den Oberflächen, bewegt sich die Schicht an der oberen Platte ebenfalls mit der Geschwindigkeit V . Die Geschwindigkeit an der unteren Platte ist demnach null. Für ein newtonsches Fluid ist ein linearer Geschwindigkeitsverlauf entlang des Abstandes der Platten y erkennbar. Es ergibt sich für die Geschwindigkeit $w(y)$ an der Stelle y :

$$w(y) = \frac{y}{h} \cdot V. \quad 3-13$$

An der oberen Platte greift eine Tangentialkraft in Bewegungsrichtung an, die den Reibungskräften des Fluids entgegenwirkt. Wie bereits erwähnt, ist diese Kraft oder Schubspannung (Kraft bezogen auf die Fläche) proportional zum Verhältnis W/h . Allgemein ergibt sich daraus das Elementargesetz für die Fluid-Reibung

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}. \quad 3-14$$

Die Materialkonstante η ist sehr stark von der Temperatur des Fluids abhängig und wird als Viskosität bezeichnet. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Viskosität von Flüssigkeiten ab.

3.2.1.2 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl Re ist eine in der Strömungslehre oft verwendete dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskräften (Viskosität) eines Fluids darstellt. Die Trägheitskräfte werden dabei über die Dichte ρ , die charakteristische Geschwindigkeit des Strömungsfeldes w_c und die charakteristische Länge l_c beschrieben.

$$Re = \frac{\rho \cdot v_c \cdot l}{\eta} = \frac{v \cdot l}{\nu} . \quad 3-15$$

Die genaue Herleitung der Reynolds-Zahl ist z.B. in [97, 98] zu finden. Der Wert der Reynolds-Zahl kann für viele Fälle (überstömte Platte, Rohrströmung, Zylinderumströmung) eine Aussage über die Strömungsart (laminar oder turbulent) liefern. Auf diese verschiedenen Arten der Strömung wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

3.2.2 Laminare und turbulente Strömung

Unter laminarer Strömung wird eine „wohlgeordnete“ Strömung verstanden, bei der die Fluidteilchen ungestörten Strömungsbahnen folgen. Dabei erfolgt die Impulsübertragung zwischen benachbarten Fluidteilchen über molekulare Wechselwirkungen. Bei turbulenten Strömungen treten stark schwankende lokale Strömungsgeschwindigkeiten auf. Die Schwankungen reichen in alle drei Strömungsrichtungen hinein. Dadurch kommt es lokal zu großen Geschwindigkeitsunterschieden, was wiederum zu erhöhter Impulsübertragung führt. Welche Art der Strömung vorliegt, wird über die Reynolds-Zahl definiert. Der Übergang von einer laminaren in eine turbulente Strömung ist stark von dem umströmten bzw. durchströmten Körper abhängig. Deshalb sind im Folgenden die Rohrströmung und die Zylinderumströmung und ihre ausschlaggebenden Reynolds-Zahlen dargestellt.

3.2.2.1 Rohrströmung

In Abbildung 3-2 ist links die laminare Rohrströmung (Hagen-Poiseuille-Strömung) und rechts die turbulente Rohrströmung dargestellt. Die laminare Rohrströmung weist eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung auf, wobei an der Rohrwand die Geschwindigkeit aufgrund der Adhäsion des Fluids den Wert Null annimmt. Die maximale Geschwindigkeit ist in der Rohrachse doppelt so groß wie die mittlere Geschwindigkeit.

Die turbulente Strömung ist durch einen steilen Anstieg der Geschwindigkeit in Wandnähe gekennzeichnet (siehe Abbildung 3-2 rechts). Im restlichen Teil des Querschnittes steigt sie jedoch nur geringfügig, das bedeutet, die maximale Geschwindigkeit ist nur um den Faktor 1,25 größer als die mittlere Geschwindigkeit.

Die turbulente Strömung geht mit einem erhöhten Druckverlust und einer erhöhten Wandschubspannung einher. Für die turbulente Strömung ergibt sich eine Proportionalität zwischen Druckverlust und mittlere Geschwindigkeit ins Quadrat. Bei der laminaren Strömung dagegen ist der Druckverlust nur zur mittleren Geschwindigkeit proportional [99].

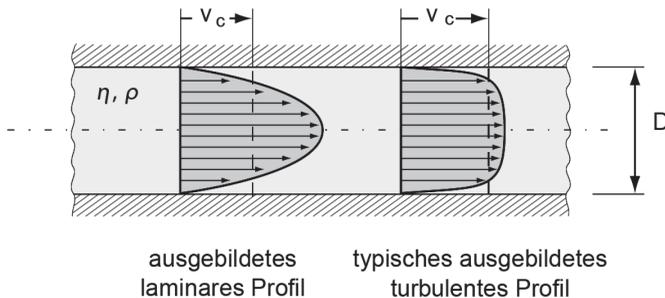


Abbildung 3-2: Rohrströmung [97]

Die charakteristische Länge ist bei der Rohrströmung der Durchmesser des Rohres. Für die charakteristische Geschwindigkeit wird die mittlere Geschwindigkeit eingesetzt. Die Strömungszustände in glatten und geraden Rohrleitungen lassen sich in folgende Bereiche einteilen [100]:

- i) $Re < 2300$ *laminare Strömung*
- ii) $2300 < Re < 10000$ *Übergangsströmung (labiles Strömungsverhalten)*
- iii) $Re > 10000$ *Turbulente Strömung*

Einbauten, Schüttungen, Rohrbiegungen oder Feststoffteilchen stören jedoch die Strömung und dadurch kann der Übergang von laminar zu turbulent schon bei geringeren Reynolds-Zahlen stattfinden. Bei turbulenter Strömung beeinflusst außerdem die Rauheit die Rohrwand die Strömungsverhältnisse sehr stark.

Der Druckverlust Δp für ein Rohrstück mit der Länge L und dem Durchmesser D , das mit einer mittleren Geschwindigkeit w_c durchströmt wird, ergibt sich zu

$$\frac{\Delta p_v}{\rho} = \lambda \cdot \frac{L \cdot w_c^2}{D \cdot 2}. \quad 3-16$$

Der dimensionslose Koeffizient λ nennt sich Rohrreibungszahl. Für die Hagen-Poiseulle (laminare) Strömung ergibt sich die Rohrreibungszahl zu

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad 3-17$$

Für turbulente Strömungen kann die Rohrreibungszahl nur messtechnisch erfasst werden. Dabei ist λ nicht nur von der Reynolds-Zahl abhängig, sondern auch von der relativen Rauheit der Rohrwand. Hierzu sind semiempirische Gleichungen zur Berechnung der Rohrreibungszahl in Tabellenwerken zu finden [99].

3.2.2.2 Zylinderumströmung

Im Folgenden wird auf die Zylinderumströmung etwas genauer eingegangen, da die Fasern des Gewebes eine zylindrische Grundform besitzen. Die charakteristische Länge der Reynolds-Zahl ist bei der Zylinderumströmung der Durchmesser der Grundfläche des Zylinders. Das Strömungsverhalten lässt sich dabei in mehrere Bereiche einteilen, die in Abbildung 3-3 dargestellt sind.

Bei Reynolds-Zahlen zwischen 0 und 4 laufen die Stromlinien exakt um den Zylinder. Dabei ist keine Ablösung der Grenzschicht zu erkennen. Die Strömung wird auch schleichende Strömung genannt. Bei Reynolds-Zahlen zwischen 4 und 40 kommt es hinter dem Maximum des Durchmessers zur Ablösung der laminaren Grenzschicht, was die Ausbildung eines länglichen Totwassergebietes zur Folge hat. Im Bereich von $40 < Re < 160$ bilden sich hinter dem Zylinder periodische Wirbelkonfigurationen, die auch Kármánsche Wirbelstraße genannt werden. Die Ablösung der Wirbel erfolgt abwechselnd ober- und unterhalb des Zylinders. Zwischen $160 < Re < 1000$ schließen sich den Wirbeln unregelmäßig Strömungsbewegungen an, die die Wirbel allmählich verdecken. Jedoch bleibt der periodische Charakter bis zu hohen Reynolds-Zahlen erhalten. Erst bei Reynolds-Zahlen größer 10000 geht die Periodizität komplett verloren und es entstehen hinter dem Zylinder unregelmäßige Wirbel mit starker Querdiffusion. An den Stellen der Grenzschichtablösung verringert sich neben der Strömungsgeschwindigkeit auch die Wandschubspannung.

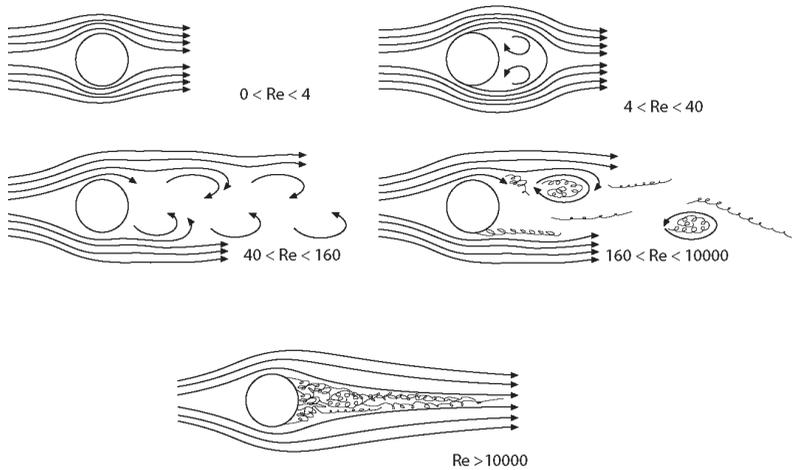


Abbildung 3-3: Phasen der Zylinderumströmung [99]

3.2.3 Stationäre und instationäre Strömungen

Unter stationären Strömungen werden Strömungen verstanden, die für einen ortsfesten Beobachter keine zeitlichen Änderungen aufweisen. Instationäre Strömungen sind durch eine Zeitabhängigkeit der Strömungsgrößen gekennzeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit treten pulsierende Strömungen auf, die zu den instationären Strömungen mit einem periodischen Zeitverhalten zählen.

3.3 Diffusion und Konvektion

Da diese Arbeit sich unter anderem auch mit einer löslichen Verunreinigung beschäftigt, behandelt dieser Abschnitt die gängigen Gesetze des Stoffübergangs. Es gibt verschiedene Arten des Stoffübergangs, den molekularen Stoffübergang, auch als Diffusion bekannt und den konvektiven Stoffübergang, kurz auch Konvektion genannt. Dimensionslose Kennzahlen, die im Zusammenhang mit Diffusion und Konvektion auftreten, sind die Sherwood (Sh)-, die Schmidt (Sc)- und die Reynolds (Re)-Zahl. Die Reynolds-Zahl ist aus dem vorangehenden Abschnitt schon bekannt (siehe Gleichung 3-15), auf diese wird deshalb nicht weiter eingegangen. Die Sherwood-Zahl beschreibt das Verhältnis des konvektiven Stoffübergangstroms zum Diffusionsstrom

$$Sh = \frac{\beta \cdot l}{D_{A,B}}, \quad 3-18$$

wobei β der Stoffübergangskoeffizient, l die charakteristische Länge, die sehr stark von der Geometrie des über- bzw. durchströmten Körpers abhängt, und D der Diffusionskoeffizient des Stoffes A in Stoff B ist. Die Sherwood-Zahl ermöglicht einen Vergleich des Stoffübergangs verschiedener Systeme. Die Schmidt-Zahl ist der Quotient aus kinematischer Viskosität des Fluids B und des Diffusionskoeffizienten des Stoffes A in Fluid B.

$$Sc = \frac{\nu_B}{D_{A,B}}. \quad 3-19$$

Sie vergleicht somit den Impulstransport im Strömungsfeld und den Stofftransport im Konzentrationsfeld. Im Folgenden sind nun die Mechanismen bei der Diffusion und der Konvektion genauer beschrieben.

3.3.1 Diffusion

Diffusion tritt vor allem in Gemischen auf, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen (beispielsweise Feststoff A und Flüssigkeit B). Falls örtliche Konzentrationsunterschiede zwischen den beiden Komponenten bestehen, kommt es zum Konzentrationsausgleich durch molekulare Diffusion. Die Ursache dieser Transportvorgänge liegt in der Brown'schen Molekularbewegung. Diffusion beschreibt die natürliche Bewegung der Moleküle von einem Bereich eines Systems in einen anderen. Fick behauptete 1855 [101, 102], dass die Diffusion auf der gleichen mathematischen Grundlage wie das Fourier-Gesetz für den Wärmeübergang und das Ohm'sche Gesetz für die elektrische Leitung basiert.

Mit dieser Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang entwickelte Fick die Gesetze der Diffusion, wie sie in Gleichung 3-20 und Gleichung 3-21 dargestellt sind. Die Diffusionsstromdichte einer Komponente A ist nach Fick proportional zum Gradient der Konzentration. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Diffusion nur in eine Koordinatenrichtung stattfindet, in diesem Fall nur in die z -Richtung:

$$J_A = -A \cdot D_{A,B} \cdot \frac{dc_A}{dz}. \quad 3-20$$

Hierbei ist J_A der eindimensionale Flux, A die Fläche an der die Diffusion stattfindet, $D_{A,B}$ der Diffusionskoeffizient zwischen Komponente A und B und dc_A beschreibt den Konzentrationsgradienten. Fick entwickelte danach noch ein zweites Gesetz, das die Zeitabhängigkeit während der Diffusion beschreibt:

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = -D_{A,B} \cdot \left(\frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \cdot \frac{\partial c_A}{\partial z} \right). \quad 3-21$$

Gleichung 3-21 stellt eine Konzentrationsänderung für den Fall dar, dass die Fläche A an der der Stoffübergang stattfindet, eine Funktion der Höhe ist. Als Beispiel ist hierfür eine Querschnittsänderung eines Rohres zu nennen. Wenn A konstant ist, beschreibt diese Gleichung die eindimensionale instationäre Diffusion, auch als zweites Ficksche Gesetz bekannt [103]. Hierbei fällt der zweite Term aus Gleichung 3-21 weg und es ergibt sich für die Konzentrationsänderung

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = -D_{A,B} \cdot \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2}. \quad 3-22$$

3.3.2 Konvektiver Stoffübergang

Konvektiver Stoffübergang beschreibt den Stofftransport nicht nur durch den molekularen Austausch sondern auch durch eine makroskopische Bewegung des Fluids. Bei Konzentrationsunterschieden zwischen Oberfläche und Fluid kommt es zum Stoffaustausch. Er hängt von den Stoffeigenschaften der Komponenten und der Art der Strömung ab. Bei der Strömung kann es sich um eine erzwungene Strömung (Strömung wird von außen aufgeprägt beispielsweise durch eine Pumpe o.Ä.) oder um eine freie Strömung (d.h. sie entsteht aufgrund von Konzentrations-, Dichte- oder Temperaturunterschieden) handeln. Der konvektiv transportierte Stoffstrom setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\dot{M}_A = \beta \cdot A \cdot \Delta c_A.$$

3-23

Hierbei ist A die Fläche an der der Stoffübergang stattfindet und Δc_A das Konzentrationsgefälle zwischen Oberfläche und strömendem Fluid.

Für die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten β stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung: die Filmtheorie, die Grenzschichttheorie, die Penetrations- und die Oberflächenenerneuerungstheorie. Die Film- und Grenzschichttheorie gehen von einem stationären Stofftransport aus, während die Oberflächenenerneuerungstheorie einen instationären Stofftransport voraussetzt. Im Folgenden wird nur auf die stationären Theorien eingegangen, da die Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten im Rahmen dieser Arbeit lediglich in der stationären Phase der Reinigungskinetik erfolgt.

3.3.2.1 Filmtheorie

Die Filmtheorie geht von der Modellvorstellung aus, dass der Stoffübergang zwischen Stoff A , der sich mit der Konzentration c_{A0} auf einer ruhenden Oberfläche (sie kann sowohl flüssig als auch fest sein) befindet und dem strömenden Fluid B stattfindet. Die Konzentration des Stoffes A sinkt in der Flüssigkeit auf den Wert $c_{A\delta}$. Die Theorie geht, wie ihr Name schon sagt, davon aus, dass der Stoffübergang in einem wandnahen dünnen Film an der Oberfläche erfolgt. Die Dicke dieses Filmes beträgt δ . In Abbildung 3-4 ist dieser Sachverhalt schematisch dargestellt.

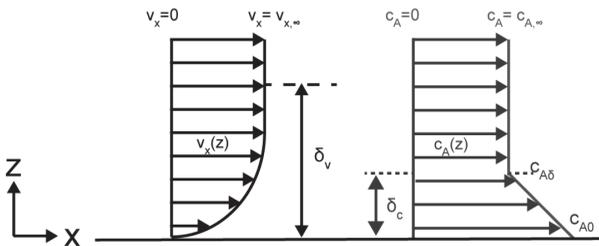


Abbildung 3-4: Strömungs- und Konzentrationsprofil bei der Filmtheorie, v_x : Geschwindigkeit an Stelle x , c_A : Konzentration an des Stoffes A .

Die Theorie gilt auch für Konvektion, wenn die Geschwindigkeitsgrenzschichtdicke δ_v deutlich größer als die Konzentrationsgrenzschichtdicke δ_c ist. Denn dann ist die Geschwindigkeit des Fluids innerhalb der Filmdicke δ_c sehr gering und deshalb vernachlässigbar. Der Stofftransport findet laut des Modells also

nur durch Diffusion statt. Die Filmtheorie sagt weiter aus, dass Konzentrationsänderungen nur in Richtung der z-Achse stattfinden, aber unabhängig von Zeit und den anderen Koordinatenrichtungen sind. Demnach ist die Filmtheorie nur für stationäre Prozesse anwendbar. Es ergibt sich mit dem 1. Fickschen Gesetz (siehe Gleichung 3-20) mit einer Schichtdicke δ_c [104] für den Massstrom des Stoffes A

$$\frac{dm_A}{dt} = -A \cdot \frac{D_{A,B}}{\delta_c} \cdot (c_{A,0} - c_{A,\delta}) \quad 3-24$$

und für den Stoffübergangskoeffizienten β

$$\beta = \frac{D_{A,B}}{\delta_c} \quad 3-25$$

Nachteil bei dieser Gleichung ist, dass die Filmdicke δ_c oft nicht bekannt ist. Sie wird jedoch oft unter Zuhilfenahme von in der Praxis oft vorkommenden Fällen abgeschätzt.

3.3.2.2 Grenzschichttheorie

Auch bei der Grenzschichttheorie wird davon ausgegangen, dass der Stoffübergang in einer dünnen wandnahen Schicht stattfindet. Im Unterschied zur Filmtheorie können Konzentrations- und Geschwindigkeitsänderungen aber nicht nur in z-Richtung sondern auch in x-Richtung auftreten. Wenn die Änderung des Konzentrationsprofils in z-Richtung viel größer ist als in die übrigen Koordinatenrichtungen, kann die Konzentrationsprofiländerung in x-Richtung gegenüber derjenigen in z-Richtung vernachlässigt werden ($\partial^2 c_A / \partial x^2 = 0$). Für die Geschwindigkeitsänderung gilt die analoge Annahme. Für die Beschreibung der Theorie wird das Modell der überströmten Platte herangezogen (siehe Abbildung 3-5).

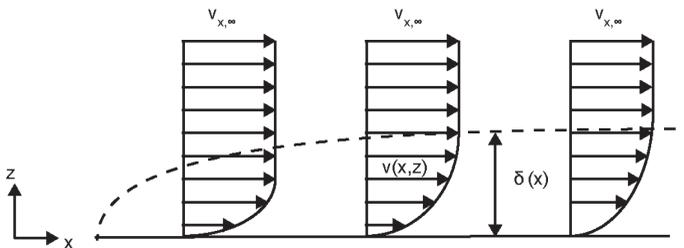


Abbildung 3-5: Grenzschichttheorie an einer längsangeströmten Platte

Dabei ist $v_{x\infty}$ die Geschwindigkeit der Außenströmung und $v(x, z)$ die Geschwindigkeit in der laminaren Grenzschicht. Unter Berücksichtigung einer stationären, reibungsbehafteten zweidimensionalen Strömung in z und x -Richtung mit den dimensionslosen Größen $v_x^* = v_x/v_{x\infty}$; $v_z^* = v_z/v_{z\infty}$; $x = x/L$; $y = y/L$ setzt sich die Navier-Stokes-Gleichung folgendermaßen zusammen:

$$v_x^* \cdot \frac{\partial v_x^*}{\partial x^*} + v_z^* \cdot \frac{\partial v_z^*}{\partial z^*} = \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 v_x^*}{\partial z^{*2}} \quad 3-26$$

mit

$$Re_L = \frac{v_{x\infty} \cdot L}{\nu_{Fluid}} \quad 3-27$$

Dabei ist L die Länge der querangeströmten Platte und ν_{Fluid} die kinematische Viskosität des Fluids. Für die stationäre zweidimensionale Diffusion ohne chemische Reaktion ergibt sich folgende Stofftransport-Gleichung:

$$v_x \cdot \frac{\partial c_A}{\partial x} + v_z \cdot \frac{\partial c_A}{\partial z} = D_{A,B} \cdot \left(\frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \right) \quad 3-28$$

Für die dimensionslose Schreibweise ergibt sich dann:

$$v_x \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x^*} + v_z \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z^*} = \frac{1}{Re_L \cdot Sc} \cdot \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^{*2}} \right) \quad 3-29$$

mit

$$\xi = \frac{c_A - c_{A,\infty}}{c_{A0} - c_{A,\infty}} \quad 3-30$$

und mit der Schmidt-Zahl Sc :

$$Sc = \frac{\nu_B}{D_{A,B}} \quad 3-31$$

Hierbei ist c_{A0} die Konzentration an der Phasengrenze und $c_{A,\infty}$ die Konzentration des Stoffes A in großen Abstand zur Phasengrenze. Durch Lösen der Differentialgleichung ergibt sich für $Sc > 0,7$ folgende lokale Sherwood-Zahl:

$$Sh_L = \frac{\beta \cdot L}{D_{A,B}} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_L} \cdot Sc^{1/3} \quad 3-32$$

Somit kann der Stoffübergangskoeffizient β für den Fall der querangeströmten Platte berechnet werden. Diese Berechnung ist nur möglich, da das Konzentrationsfeld und das Geschwindigkeitsfeld im Fluid bekannt ist. Die Lösung der partiellen Differentialgleichung ist nur in relativ einfachen Fällen möglich (laminare Rohrströmung und längsangeströmte ebene Platte mit laminarer Grenzschichtströmung). Bei komplizierteren Fällen müssen deshalb Experimente durchgeführt werden, die die Zusammenhänge klären können [105]. Eine Möglichkeit ist dabei die Durchführung einer Dimensionsanalyse. Mithilfe der Versuchsergebnisse, ist es dann möglich, das Zusammenspiel der einzelnen Kennzahlen zu beschreiben [97].

3.4 Fluoreszenz

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Detektion der Verunreinigung auf dem Filtermedium die Fluoreszenz ausgenutzt. Deshalb soll im Folgenden auf die theoretischen Grundlagen dieses Phänomens eingegangen werden. Der Oberbegriff von Phosphoreszenz und Fluoreszenz ist die Lumineszenz. Die Lumineszenz beschreibt die Fähigkeit eines Stoffes, Licht zu emittieren. Dabei werden Elektronen bestimmter fluoreszierender Moleküle in einen energetisch höheren Zustand angehoben. Der Unterschied zwischen Phosphoreszenz und Fluoreszenz ist in der Art des angeregten Zustandes begründet. Bei der Fluoreszenz befindet sich das durch ein Photon angeregte Elektron im Singulett-Zustand (S_2) und bei der Phosphoreszenz im Triplett-Zustand (T_1) (siehe Abbildung 3-6). Diese angeregten Zustände sind energetisch ungünstig und nicht stabil. Bei der Fluoreszenz erfolgt sofort ein strahlungsloser Übergang (IC = internal conversion) vom S_2 - zum niedrigeren S_1 -Niveau.

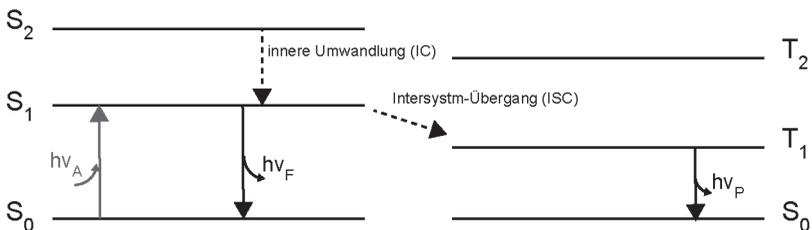


Abbildung 3-6: Jablonski Diagramm

Danach gehen die Elektronen vom S_1 – Energiezustand direkt in den S_0 -Zustand über. Die Dauer beträgt weniger als $1 \cdot 10^{-8}$ s. Dabei wird Energie frei, die bei der Fluoreszenz eine Emission von Photonen bedeutet.

Bei der Phosphoreszenz geht das Elektron vom Singulett-Zustand (S_1) in den Triplett-Zustand (T_1) über. Dieser Prozess wird als Intersystem-Übergang (inter system crossing = ISC) bezeichnet und ist strahlungslos. Vom T_1 -Zustand gelangt das Elektron unter Emission von Photonen letztendlich wieder in den S_0 -Zustand. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang ist jedoch sehr gering. Der Übergang in den S_0 -Zustand ist mit einer Spinumkehrung der Elektronen verbunden, was deshalb bis zu Stunden dauern kann.

4 Materialien

4.1 Lösliche Verunreinigung

Für die Kontaminierung der Gewebe kamen, wie bereits erwähnt, eine lösliche und eine unlösliche, partikuläre Verunreinigung zum Einsatz. Die eingesetzten löslichen Verunreinigungen waren Riboflavin und Malzextrakt, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

4.1.1 Riboflavin

Riboflavin, auch als Vitamin B2 bekannt, ist ein fluoreszierender Stoff, der im ungelösten Zustand als stäbchenförmiger Kristall vorliegt (siehe Abbildung 4-1 rechts). Riboflavin hat ein Molekulargewicht von 376,4 g/mol und eine Löslichkeit in Wasser von 0,065 g/l bei einer Temperatur von 20°C. Die Strukturformel ist in Abbildung 4-1 links dargestellt.

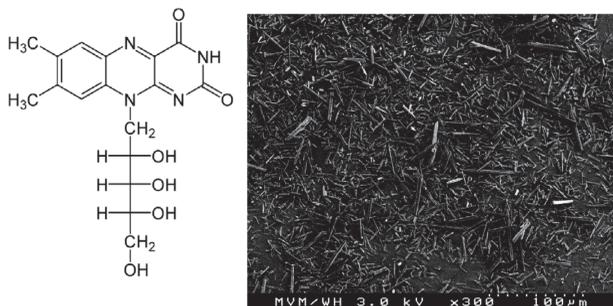


Abbildung 4-1: Riboflavin, links: Strukturformel, rechts: nadelförmige Kristalle des Riboflavin (REM-Bild).

Die Absorption liegt bei 470 nm und die maximale Emission bei 530 nm. Bei einer Dichte von $0,2 \text{ g/cm}^3$ nimmt das Riboflavin-Molekül ein Volumen von $3,1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3$ ein, was einer Kantenlänge von 15 Å entspricht. Riboflavin kommt oft zur Kontrolle von Reinigungsprozessen in der Pharmaindustrie zum Einsatz (VDMA- oder Riboflavintest), da es auch in sehr geringer Konzentration mithilfe einer UV-Lampe nachweisbar ist. Dabei werden kritische Stellen der Anlage mit einer Riboflavin-Zellulose-Mischung eingesprüht und danach gereinigt.

Mit der UV-Lampe ist es nach der Reinigung möglich, zu beurteilen, ob der Reinigungsprozess erfolgreich war. Es ist ebenfalls möglich, Konzentrationsbestimmungen mithilfe eines UV-Spektrometers bis zu einer minimalen Konzentration von 10^{-7} g/l durchzuführen.

4.1.2 Malzextrakt

Malzextrakt ist ein malzartiger Sirup, in diesem Fall hergestellt aus Gerste. Anwendung findet er unter anderem als Backmittel. Die Hauptbestandteile sind Maltose (40-50 vol%), Dextrine (10-21 vol%), verschiedene Proteine und Aminosäuren (4-6 vol%), Glukose (28 vol%), verschiedene Salze (1,5 vol%) und Vitamine. Die Viskosität des verwendeten Malzextraktes beträgt bei Raumtemperatur 9500 mPa. Aufgrund der verschiedenen Zucker- und Proteinarten im Malzextrakt, bildet sich nach der Kontamination ein homogener, rissfreier Film auf dem Filtermedium. Um das Malzextrakt besser detektieren zu können, wurde dem Malzextrakt Esculin, einem Glucosid, das bei Bestrahlung mit Licht der Wellenlänge 366 nm fluoresziert, beigemischt. Esculin gehört zur Gruppe der Cumarine und ist in der Rinde und den Samen des Rosskastanienbaumes zu finden. Nach Aufheizen des Malzextraktes auf 80°C werden ihm 2 ml einer Esculin-Wasser Lösung mit einer Konzentration von 5 g/l hinzugefügt. Die Fluoreszenz ermöglicht es die Konzentration an Malzextrakt indirekt mithilfe des UV/ VIS-Spektrometers zu detektieren.

4.2 Partikuläre Verunreinigung

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der partikulären Verunreinigung. Die eingesetzten Partikel wurden von der Firma Microparticles GmbH bezogen. Dabei handelte es sich um monodisperse Melaminharzpartikel, die mit dem Fluoreszenzfarbstoff 7-Amino-4-methylcoumarin (AMC) markiert sind. Der Vorteil bei dieser Fluoreszenzmarkierung ist, dass die Fluorochrome im Partikelinnern homogen verteilt sind, weshalb alle Partikel gleiche Oberflächeneigenschaften aufweisen. Dadurch können sie in einem Fluoreszenzmikroskop sicht-

bar gemacht und zur Bestimmung des Rückstandes vor und nach der Reinigung ausgezählt werden. In Tabelle 4-1 sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der Partikel aufgelistet:

Tabelle 4-1: Eigenschaften des eingesetzten Partikelsystems

Dichte	1,51 g/cm ³
Brechungsindex	1,68
Temperaturstabilität	bis 300°C
Anregung/ Emission AMC	360 Nm/ 429 Nm

Die Partikel besitzen eine hydrophile kationische Oberfläche und sind unlöslich in Säuren und Laugen. In Abbildung 4-2 ist eine REM-Aufnahme einiger Partikel dargestellt.

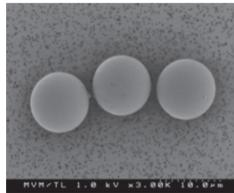


Abbildung 4-2: REM-Aufnahme der Melaminharzpartikel

Für die Untersuchungen kamen Partikel von 5 und 10 µm zum Einsatz. Die 5 µm-Partikel hatten eine Partikelgröße von $4,71 \pm 0,08 \mu\text{m}$ und die 10 µm-Partikel eine Größe von $9,8 \pm 0,15 \mu\text{m}$.

4.3 Filtergewebe zur Kuchenfiltration

Dieser Abschnitt liefert einen Überblick von Filtergeweben, die hauptsächlich in der Kuchenfiltration zum Einsatz kommen. Dabei liegt der Schwerpunkt vor allem auf Polymergeweben. Der zweite Teil dieses Abschnitts beschäftigt sich mit der Berechnung der Porosität der verschiedenen Webarten.

4.3.1 Überblick

Die Filtermedien, die bei diesen Untersuchungen zum Einsatz kamen, waren monofile Polymergewebe unterschiedlicher Webarten und Materialien. Polymergewebe kommen hauptsächlich bei Band-, Trommel-, Scheiben-, Plan-, Blattfiltern, Zentrifugen und Filterpressen zum Einsatz. Es wird zwischen drei Arten

von Geweben unterschieden: Monofile oder einlagige Gewebe, bei denen die Bindung aus zwei einzelnen Fäden besteht, multifile Gewebe, bei denen sich jeder Faden aus mehreren Fibrillen zusammensetzt und den Doppellagen Geweben, die aus zwei Gewebelagen bestehen. In Abbildung 4-3 sind Beispiele für die drei verschiedenen Arten dargestellt.



Abbildung 4-3: Gewebearten, a) monofiles Gewebe, b) Doppellagen-Gewebe; c) multifiles Gewebe [Sefar-Verkaufsbrochüre]

Alle Gewebe bestehen aus zwei verschiedenen Fäden, den Schuss- und den Kettfäden. Die Kettfäden sind die Fäden, die im Webstuhl in Längsrichtung aufgespannt sind. Sie liegen quer zur Webkante, während die Schussfäden längs dazu verlaufen (Abbildung 4-3 a)) Bei dem dargestellten Gewebe hat der Kettfaden einen größeren Durchmesser als der Schussfaden.

Aufgrund der glatten Oberfläche der Monofilamentgarne neigen diese bei der Kuchenfiltration nur gering zur Verstopfung. Ein Fadenbruch kann jedoch zu unerwünschtem Partikeldurchtritt führen. Eine höhere Stabilität weisen dagegen Multifilamentgarne auf. Ein Fadenbruch wirkt sich hierbei nicht gleich in einem Partikeldurchtritt aus [106], jedoch können die Verunreinigungen nach dem Kuchenabwurf vermehrt an den Einzelfäden hängen bleiben.

Die multifilen und monofilen Gewebe können in verschiedenen Materialien, Filterfeinheiten und Konstruktionen auftreten. Die einfachste Gewebekonstruktion ist die Leinwandbindung (Plain weave). Hierbei überkreuzen sich Kett- und Schussfäden abwechselnd und bilden quadratische Porenöffnungen. Meistens werden bei einer Leinwandbindung Kett- und Schussfäden gleichen Durchmessers und gleicher Anzahl verwendet. Leinwandbindungen, bei denen Durchmesser und Anzahl der Kettfäden viel kleiner, verglichen mit denen der Schussfäden sind, werden mit Plain Dutch (PD) bezeichnet. Bei der Plain Reverse Dutch (PRD) verhält es sich gerade umgekehrt (siehe Abbildung 4-4). Hier weisen die Kettfäden die größeren Durchmesser und die geringere Anzahl als die Schussfäden auf. Da die Fasern in diesem Verbund am Wenigsten gestreckt

vorliegen, erzeugt diese Bindung die geringste Steifigkeit. Bei einer Körperbindung (Twilled = TWL) überspringt der Schussfaden nach einem festgelegten Muster eine definierte Menge (mindestens zwei) Kettfäden (siehe Abbildung 4-4 b)).

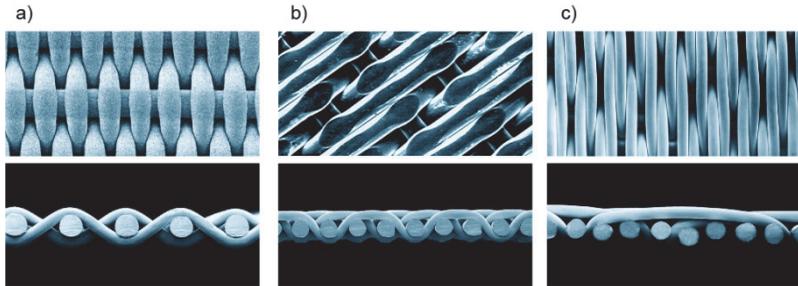


Abbildung 4-4: unterschiedliche Webarten (obere Reihe Draufsicht, untere Reihe Seitenansicht), a) PRD-Gewebe; b) TWL-Gewebe; c) STN-Gewebe [Sefar-Verkaufsbrochüre]

Ein weiteres Merkmal einer Körperbindung ist, dass der Gewebegrat schräg verläuft und Schuss- und Kettfäden oft unterschiedliche Durchmesser aufweisen. Aufgrund einer geringeren Anzahl an Kreuzungspunkten, liegen die Fäden im Verbund gestreckt vor und erzielen dadurch eine vergleichsweise hohe Steifigkeit. Bei einer Atlasbindung (Satin = STN) führt der Schussfaden unter einem Kettfaden hindurch und danach über mehr als zwei Kettfäden hinweg (Abbildung 4-4 c)). Diese Bindung besitzt von den bereits vorgestellten Gewebearten die höchste Steifigkeit, da hier die geringste Anzahl an Kreuzungspunkten vorhanden ist, was die größte Faserstreckung zur Folge hat.

Eine weitere Einteilung der Gewebe kann über die Oberflächenbeschaffenheit erfolgen. Dabei gibt es die Unterscheidung zwischen kalandriert und nicht kalandriert. Die Kalandrierung ist eine Wärmebehandlung von Polymergeweben, die eine glattere Oberflächentextur zur Folge hat. Dabei werden die Gewebe durch zwei schwere beheizbare Rollen bei definierten Pressdrücken und Temperaturen gedrückt. Eine Folge dieser Behandlung ist eine Reduzierung der Filterdicke, eine Veränderung des Luftdurchlasses und eine glattere Oberfläche.

4.3.2 Berechnung der Porosität der Gewebekonstruktionen

Um den Einfluss verschiedener Gewebekonstruktionen und Oberflächenkonfektionierungen auf die Reinigbarkeit untersuchen zu können, ist es notwendig, alle anderen Parameter wie Porengeschwindigkeit des Fluids, Filterdicke und Mate-

rial konstant zu halten. Es ist jedoch sehr schwierig Filtermedien zu finden, die diese Kriterien erfüllen. Deshalb wurde die Porosität der Gewebe mithilfe geometrischer Parameter berechnet. Somit ist es möglich, die benötigte Anströmgeschwindigkeit zu bestimmen, um bei den verglichenen Filtermedien konstante Geschwindigkeiten in den Poren einzustellen. Die Porosität des Filtermediums lässt sich nach Gleichung 4-1 berechnen:

$$\varepsilon = \frac{V_{gesamt} - V_{Faden}}{V_{gesamt}} \quad 4-1$$

Hierbei ist V_{gesamt} das gesamte Volumen des betrachteten Gewebeauschnittes und V_{Faden} das Volumen von Schuss- und Kettfäden. Da die Filtermedien, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, eine spezielle Oberflächenkalandrierung besitzen (super kalandriert oder kalandriert), weisen die Fäden einen elliptischen Querschnitt auf. Dabei wird d_h als der horizontale Durchmesser und d_v als der vertikale Durchmesser des Fadens bezeichnet. In den folgenden Abschnitten sind die Porositätsberechnungen für die verschiedenen Konstruktionen dargestellt.

4.3.2.1 Porosität des Plain-Reversed-Dutch-Gewebes (PRD)

Das PRD-Gewebe ist eine Leinwandbindung, bei der der Kettfaden einen größeren Fadendurchmesser als der Schuss-Faden besitzt. In Abbildung 4-5 ist das Gewebe mit seinen geometrischen Abmessungen dargestellt.

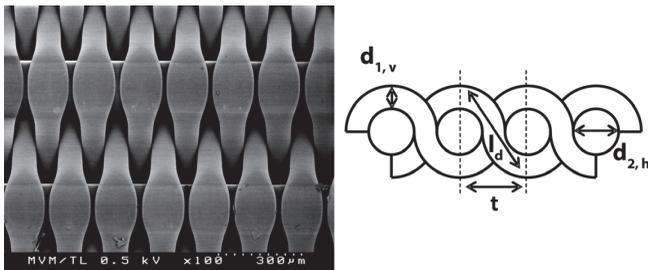


Abbildung 4-5: PRD-Gewebe, links: REM-Aufnahme, rechts: geometrische Abmessungen

Zu sehen ist hierbei die Aufsicht und die Seitenansicht des Gewebes. Da die untersuchten Gewebe kalandriert sind, werden für die Porositätsberechnungen jeweils elliptische Fadenquerschnitte angenommen. Die geometrische Abmessung l bezeichnet hierbei die Länge der Umschlingung, d_1 den Durchmesser

des Schussfadens- und d_2 den Durchmesser des Kettfadens. Die Indices v und h beschreiben die horizontalen und vertikalen Abmessungen des elliptischen Fadenquerschnitts. Die Teilung t stellt den Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier Schussfäden dar.

Eine elliptische Querschnittsfläche lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$A_{\text{elliptisch}} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_h \cdot d_v. \quad 4-2$$

Für die Berechnung der Porosität wurden zwei Schuss- und zwei Kettfäden betrachtet. Somit setzt sich das Fadenvolumen folgendermaßen zusammen:

$$V_{\text{Faden}} = V_{\text{Schuss}} + V_{\text{Kett}}, \quad 4-3$$

d. h.:

$$V_{\text{Faden}} = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_{2v} \cdot d_{2h} \cdot d_{1h} + \frac{\pi}{4} \cdot d_{1v} \cdot d_{1h} \cdot l_d \right). \quad 4-4$$

Die Länge l_d lässt sich mithilfe des Satzes vom Pythagoras berechnen:

$$l_d = \sqrt{t^2 + (d_{1v} + d_{2v})^2}. \quad 4-5$$

Dabei greift l_d jeweils im Mittelpunkt der vertikalen Faser an. Das komplette Volumen des betrachteten Gewebeausschnitts setzt sich dann folgendermaßen zusammen:

$$V_{\text{gesamt}} = t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{\text{Filter}}. \quad 4-6$$

Hierbei ist d_{Filter} die Dicke des Filtermediums. Mit den Gleichungen 4-4, 4-5 und 4-6 ist es nun möglich, die Porosität (Gleichung 4-1) zu berechnen:

$$\varepsilon = \frac{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{\text{Filter}} - \frac{\pi}{2} (d_{2h} \cdot d_{2v} \cdot d_{1h} + d_{1v} \cdot d_{1h} \cdot l_d)}{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{\text{Filter}}}. \quad 4-7$$

4.3.2.2 Porosität der Körperbindung (TWL = twilled weave)

Bei dem zu untersuchenden TWL-Gewebe handelt es sich um ein 3/1 Gewebe, das heißt hier gleitet der Schussfaden zuerst über drei und dann unter einem

Kettfäden hindurch. In Abbildung 4-6 sind das Gewebe und seine geometrischen Abmessungen dargestellt.

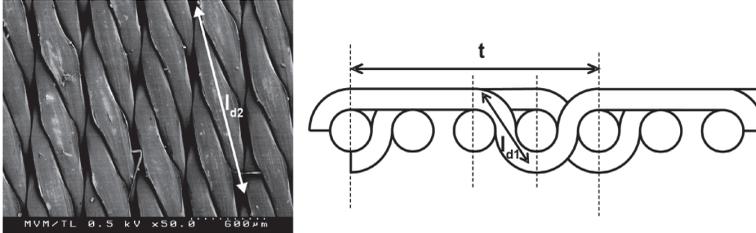


Abbildung 4-6: TWL-Gewebe, links: REM-Aufnahme, rechts: geometrische Abmessungen

Hierbei stellt die Teilung t den Abstand von vier Kettfäden dar, also die Anzahl der Kettfäden bis die Bindungsart sich wiederholt. Die Fadenlängen l_{d1} und l_{d2} , können über geometrische Betrachtungen, hier durch Anwendung des Satzes nach Pythagoras, bestimmt werden:

$$l_{d1} = \sqrt{\left(\frac{t}{4}\right)^2 + (d_{1v} + d_{2v})^2} \quad 4-8$$

$$l_{d2} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot t}{4}\right)^2 + \left(\frac{d_{1h}}{2}\right)^2} \quad 4-9$$

Somit berechnet sich die Porosität des TWL-Gewebes in Analogie zur Porosität des PRD-Gewebes mit dem Unterschied, dass ein größerer Gewebeausschnitt betrachtet wurde, folgendermaßen:

$$\varepsilon = \frac{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{filter} - \frac{\pi}{2} \cdot (d_{2v} \cdot d_{2h} \cdot d_{1h} + d_{1v} \cdot d_{1h} \cdot 2 \cdot (2 \cdot l_{d1} + l_{d2}))}{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{filter}} \quad 4-10$$

4.3.2.3 Porosität der Atlasbindung (STN = Satin-Bindung)

Das Atlasgewebe, das im Rahmen dieser Untersuchungen zum Einsatz kam, war eine 4/1 Bindung. Eine REM-Aufnahme des Gewebes und die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 4-7 zu sehen. Aus der Elektronenmikroskopie-Aufnahme ist ersichtlich, dass die Bindung aus Doppelfäden (sowohl Schuss-, als auch Kettfäden) besteht. Zur Vereinfachung sind die geometrischen Verhältnisse in Abbildung 4-7 rechts nur für Einzelfäden dargestellt. Bei

der Berechnung wurde jedoch für die Fadendurchmesser d_{1h} und d_{2h} die doppelten Durchmesser eingesetzt.

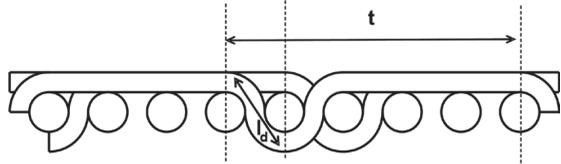
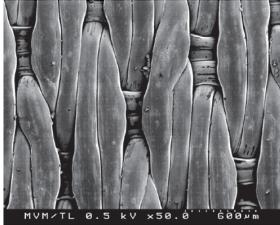


Abbildung 4-7: STN-Gewebe, links: REM-Aufnahme, rechts: geometrische Abmessungen

Die Porosität des STN-Gewebes berechnet sich nach Gleichung 4-11:

$$\varepsilon = \frac{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{filter} - \frac{\pi}{2} \cdot (4 \cdot d_{2v} \cdot d_{2h} \cdot d_{1h} + d_{1v} \cdot d_{1h} \cdot (4 \cdot l_d + 2 \cdot \frac{3}{5} \cdot t))}{t \cdot 2 \cdot d_{1h} \cdot d_{filter}} \quad 4-11$$

mit

$$l_d = \sqrt{\left(\frac{t}{5}\right)^2 + (d_{1v} + d_{2vl})^2}. \quad 4-12$$

4.3.3 Eingesetzte Filtermedien

Die für die Untersuchungen der löslichen Verunreinigungen Malzextrakt bzw. Riboflavin eingesetzten Filtermedien sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: untersuchte Filtermedien und ihre Eigenschaften

Filterbezeichnung.	Filterfeinheit in μm	Webart	Oberflächenbeschaffenheit	Freie Filterfläche in %	Material
(PP)-TWL-25	25	TWL	super kalandriert	48	PP
(PP)-STN-25	25	STN	super kalandriert	49	PP
PET-22-(SK)	22	PRD	super kalandriert	60	PET
PET-27-(K)	27	PRD	kalandriert	60	PET
PET-41-(W)	41	PRD	nicht kalandriert	61	PET
PET-12-(SK)	12	PRD	super kalandriert	61	PET
PEEK-12-(SK)	12	PRD	super kalandriert	41	PEEK

Die aufgeführte Porosität wurde mit den in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Berechnungsformeln bestimmt. Dafür erfolgten die Messungen der Gewebeparameter (Durchmesser Schuss- und Kettfaden, Teilung t) mithilfe eines Auflichtmikroskops. In der Tabelle sind die charakteristischen Eigenschaften der Gewebe dargestellt. Alle Filtermedien wurden kreisförmig mit einem Durchmesser von 40 mm zugeschnitten, damit sie in die Reinigungsanlage und Filterhalterung eingebaut werden können.

Um eine Abdichtung der Filtermedien zu gewährleisten und eine Querströmung der Flüssigkeit in der Filterhalterung zu vermeiden, wurden die Filtergewebe am Rand mit einem 7 mm breiten Gummibelag (PLASTI DIP, Firma Performix) überzogen. In Abbildung 4-8 sind die Filtermedium mit diesem Belag abgebildet: Die Gewebe mit Gummibelag kamen sowohl für die Versuche in der kontinuierlichen Durchströmungsanlage als auch in der Anlage zur pulsierenden Reinigung zum Einsatz.



Abbildung 4-8: Filtermedien mit Gummibelag (schwarz), A: Filtermedium PET-SK-22, B: Filtermedium PET-SK-12

5 Aufbau der Versuchseinrichtungen

Zur Durchführung der Versuche mit kontinuierlicher und pulsierender Strömung waren verschiedene Anlagen und Analysegeräte notwendig, die nun Bestandteil dieses Abschnittes sind. Die Kontaminierung der Gewebe variierte je nach Art der Untersuchung und Art der Verunreinigung. Deshalb werden im Rahmen dieses Abschnittes drei verschiedene Kontaminierungseinrichtungen dargestellt. Für die Reinigungsbeurteilung wurden zwei verschiedene Analysemethoden angewendet. Zum einen eine direkte Methode, bei der die zurückgebliebenen Partikel bestimmt wurden und zum anderen eine indirekte Methode, bei der die Verunreinigungskonzentration im Spülwasser detektiert wurde.

5.1 Kontinuierliche Reinigungsanlage

In Abbildung 5-1 ist das Anlagenschema der Reinigungsanlage zur kontinuierlichen Reinigung dargestellt. Die kontinuierliche Reinigungsanlage besteht aus zwei Druckbehältern, die als Vorlage für das Reinigungsmittel dienen, einer Filterhalterung, einem Durchflussmesser und einem Membranventil. Die Behälter verfügen jeweils über einen Doppelmantel, der eine Temperierung des Reinigungsmediums ermöglicht. Die Temperierung erfolgt über ein Thermostat der Firma Julabo. Ein Magnetrührer sorgt während der Temperierung für eine gute Wärmeverteilung. Das Reinigungsmedium wird mithilfe des angelegten Behälterdrucks durch das Filtermedium gefördert. Dadurch kann eine Beeinflussung der Reinigung durch Pulsstöße, wie sie beispielsweise bei einer Förderung mithilfe einer Pumpe auftreten können, verhindert werden. Die Aufzeichnung des Durchflusses erfolgt mit einem Durchflussmesser der Firma Endress und Hauser. Die Anlage besitzt für eine manuelle Regulierung des Massenstroms ein pneumatisches Stellventil. Zusätzlich sind zur Messung des Druckes in den Behältern vor und nach der Filterhalterung Drucksensoren angebracht und die

Temperaturregelung erfolgt über Temperatursensoren. Das Kernstück der Anlage ist die Filterhalterung. In Abbildung 5-1 b) ist diese schematisch dargestellt. Sie wird, aufgrund der besseren Handhabung beim Ein- und Ausbau des Filtermediums, von unten nach oben durchströmt. Die Verunreinigung befindet sich auf der Oberseite des Gewebes, also auf der strömungsabgewandten Seite.

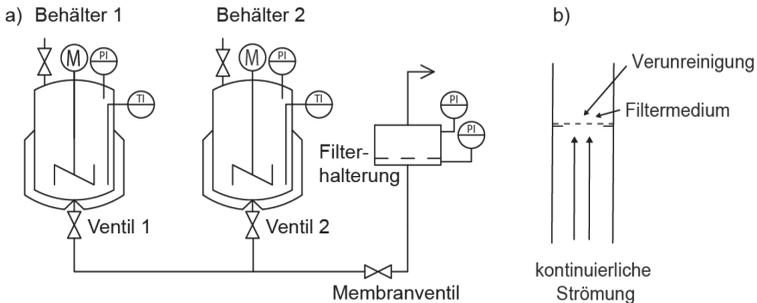


Abbildung 5-1: Anlagenschema der kontinuierlichen Reinigungsanlage, a) Gesamtanlage, b) Filterhalterung

Die Filterhalterung ist eine modifizierte Milchrohr-Verschraubung, in die das Filtermedium eingespannt wird. Die Modifikation besteht darin, dass am Kegelstutzen der Verschraubung eine O-Ring Nut eingedreht ist, die eine Abdichtung ermöglicht und eine Querströmung der Flüssigkeit während des Prozesses verhindert (siehe Abbildung 5-2 rechts). Das Filtermedium wird in den Gewindestutzen eingelegt (siehe Abbildung 5-1 links) und fest verschraubt.



Abbildung 5-2: Filterhalterung der Durchströmungsanlage, links: Gewindestutzen mit eingelegtem Filtermedium, rechts: Kegelseitenansicht mit O-Ring Nut und O-Ring

In Abbildung 5-3 ist ein Ausschnitt der Reinigungsanlage dargestellt. Zu sehen ist die Filterhalterung (1) im eingebauten Zustand und das Membranventil (2), mit dem der Reinigungsprozess gestartet wird. Die Strömungsrichtung erfolgt von rechts nach links.

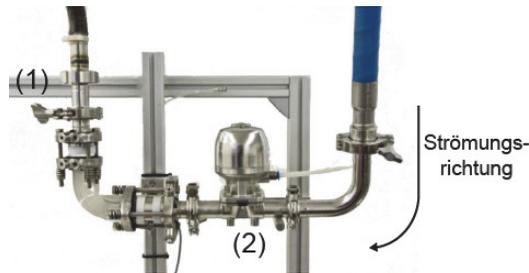


Abbildung 5-3: Ausschnitt der Reinigungsanlage, (1) Filterhalterung, (2) Membranventil

Mithilfe einer drehbaren Lagerung des kompletten Rohrstückes ist es möglich, dieses um 90° zu drehen. Diese Drehung erleichtert die Entleerung des Flüssigkeitsvolumens oberhalb des Filtermediums und den Ausbau desselben nach dem Reinigungsversuch.

5.2 Reinigungsanlage zur pulsierenden Reinigung

Die Anlage zur pulsierenden Reinigung ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Sie besteht aus einem Druckbehälter, der als Vorlage für das Reinigungsmittel dient, einer Filterhalterung und einer Puls-Einheit. Bei der Puls-Einheit ist ein Magnetventil (Firma Bürkert) mit einer Düse verbunden.

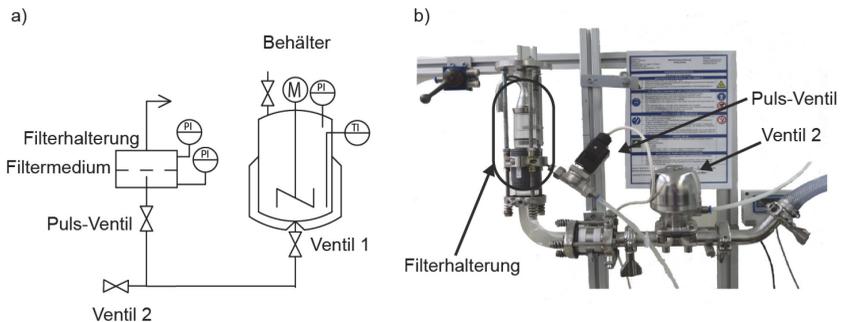


Abbildung 5-4: Reinigungsanlage zur pulsierenden Reinigung a) Anlagenschema, b) reale Anlage

Das Magnetventil lässt sich mit einer Siemens Logo-Steuerung programmieren. Parameter sind hierbei die Pulsdauer, die Pausenzeit des Pulses und die gesamte Prozesszeit. Der Pulsstrom wird von einem 20 l Behälter gespeist und die Förderung der Flüssigkeit erfolgt pneumatisch durch Anlegen eines Druckes am

Behälter. Die Filterhalterung wird, wie auch im Schema angedeutet, von unten nach oben durchströmt. Die Halterung ist ebenfalls wie bei der kontinuierlichen Reinigungsanlage drehbar gelagert und die Verunreinigung befindet sich auf der Oberseite des Gewebes. Das Filtermedium ist zwischen zwei Plexiglaszylindern eingespannt, die durch ein pneumatisches Hubventil aufeinandergedrückt werden. Für den Ausbau der Filtermedien ist es möglich, die Einheit um knapp über 90° zu kippen. Damit ist gewährleistet, dass die Flüssigkeit oberhalb des Filtermediums komplett ablaufen kann und es zu keinem weiteren Ablösen von Partikeln nach dem Versuch kommt. Über Ventil 2 konnte dem Puls-Strom aus der Düse noch eine kontinuierliche Strömung überlagert werden.

Die Filterhalterung inklusive Düse und Magnetventil ist in Abbildung 5-5 detailliert dargestellt. Die eingesetzten Filterrondellen besitzen einen Durchmesser von 40 mm, auf die am Rand ein 7 mm dicker Gummibelag zur Abdichtung aufgepinselt ist (siehe Abbildung 4-8). Somit beträgt die durchströmbare Fläche $5,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Die Düse hat über die gesamte Länge einen konstanten Durchmesser von 3,1 mm und der Abstand zwischen Düse und Filtermedium wurde zwischen 17 und 50 mm variiert. Das Rückschlagventil, das in Abbildung 5-5 dargestellt ist, war bei allen Versuchen geschlossen, da die Versuche ohne Überlagerung einer kontinuierlichen Strömung erfolgte.

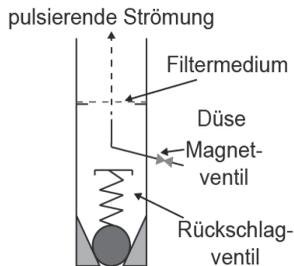


Abbildung 5-5: Pulseinheit

Vor Beginn des eigentlichen Versuchs ist die Rohrleitung unterhalb der Filterhalterung mit VE-Wasser vorzufüllen, um bei Versuchsstart Lufteinflüsse zu vermeiden. Danach erfolgt der luftblasenfreie Einbau des kontaminierten Filtermediums in die Filterhalterung. Vor Versuchsbeginn ist es notwendig, den oberen Teil (oberhalb des Filtermediums) vorsichtig mit VE-Wasser aufzufüllen. Nach Einstellen der Pausenzeit, Pulsdauer und gesamter Prozesszeit kann der Versuch gestartet werden.

5.3 Apparate zur Kontaminierung der Gewebe

Da für die verschiedenen Verunreinigungsarten unterschiedliche Kontaminierungsmethoden zum Einsatz kamen, werden die dafür verwendeten Apparate im Folgenden näher erläutert.

5.3.1 Kontaminierungseinheit

Die Kontaminierungseinheit ist notwendig, um die Gewebe vor der Reinigung so reproduzierbar wie möglich zu verunreinigen. Sie kam sowohl bei der partikulären (fluoreszierenden Melaminharzpartikel) als auch bei der löslichen Verunreinigung (Riboflavin) zum Einsatz. Sie funktioniert nach dem Prinzip einer Drucknutsche. In Abbildung 5-6 sind die Kontaminierungseinheit und die zugehörigen Bauteile dargestellt.

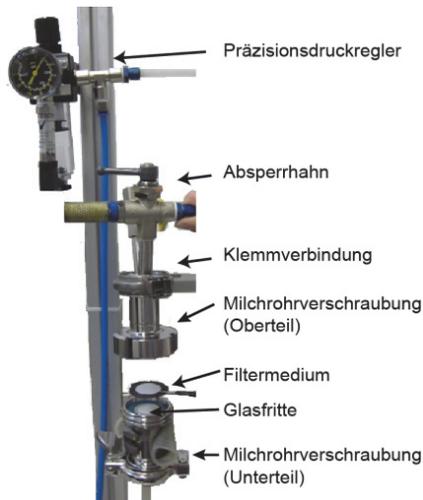


Abbildung 5-6: Kontaminationseinheit zur Kontaminierung der Gewebe

Das Filtermedium wird in die Milchrohrverschraubung eingelegt und danach der Kegelstutzen mit der Gewindemutter verschraubt. Unterhalb des Gewebes befindet sich eine Glasfritte, die während der Kontaminierung eine Stützfunktion für das Filtermedium übernimmt. Nach Einfüllen der gewünschten Suspension und nach Schließen der Klemmverbindung wird die Suspension mithilfe von Druckluft durch das Gewebe gefördert (Druckeinstellung erfolgt über den Präzisionsdruckregler). Nach erfolgreicher Kontaminierung wird die Einheit an der

Milchrohrverschraubung aufgeschraubt und das kontaminierte Filtermedium entnommen.

Für die Versuche mit Partikeln kamen, wie bereits erwähnt, monodisperse fluoreszierende Melaminharzpartikel zum Einsatz. Da diese Forschungspartikel relativ teuer sind, war es notwendig, die zu kontaminierende Fläche zu verringern. Dazu wurde ein Einsatz in das Oberteil der Milchrohrverschraubung eingeführt.

In Abbildung 5-7 a) ist der Einsatz in nicht eingebauten Zustand und in b) im eingebauten Zustand dargestellt. Somit verringerte sich der Durchmesser der kontaminierten Fläche von 25 mm auf 9,1 mm.

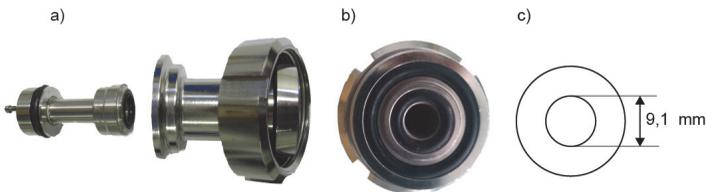


Abbildung 5-7: Einsatz für die Kontaminationseinheit zur Verringerung der kontaminierten Fläche, a) links Einsatz, rechts Oberteil der Milchrohrverschraubung; b) Einsatz in Milchrohrverschraubung eingesetzt; c) Durchmesser der kontaminierten Fläche.

5.3.2 Vakuumfiltration

Für die Kontamination der Filtermedien mit Malzextrakt kam ein evakuierter Erlenmeyer-Kolben zum Einsatz, der in Abbildung 5-8 dargestellt ist.

Er besteht aus einem Glasaufsatz (für das Einfüllen der zu filtrierenden Lösung), einer Keramikmembran (befindet sich zwischen der Verbindung des Glasaufsatzes und der Saugflasche), einer Saugflasche (dort ist der Anschluss für die Vakuumpumpe angebracht) und einer Vakuumpumpe.

Nach Einsetzen des Gewebes in die Glasfritte und nach Einfüllen der Kontaminierungslösung über dem Gewebe, wurde die Vakuumpumpe eingeschaltet und die Kontaminierungslösung in die Saugflasche gesaugt. Bei richtiger Wahl der Parameter (Verhältnis Wasser-Malzextrakt und Volumen) konnte ein dünner homogener Film an Malzextrakt-Esculin auf dem Filtermedium gebildet werden.



Abbildung 5-8: Vakuumsfiltrationsgerät [Firma MILIPORE]

5.3.3 Rotator

Für die Untersuchung der Ablösemechanismen (siehe Abschnitt 8) war es notwendig, Einzelpartikel auf dem Gewebe zu haben, um die Partikelbewegungen nach der Reinigung besser detektieren zu können. Demnach war die Kontaminierungseinheit (siehe Abschnitt 5.3.1) nicht geeignet, da hier nach der Kontamination zwar ein Monolayer an Partikeln vorhanden war, manche Partikel sich aber berührten. Daher kamen hierfür ein Rotator und eine extra angefertigte Zelle, in die das Filtermedium eingespannt wurde, zum Einsatz. In Abbildung 5-9 ist die Zelle zur Kontaminierung und der Rotator dargestellt.

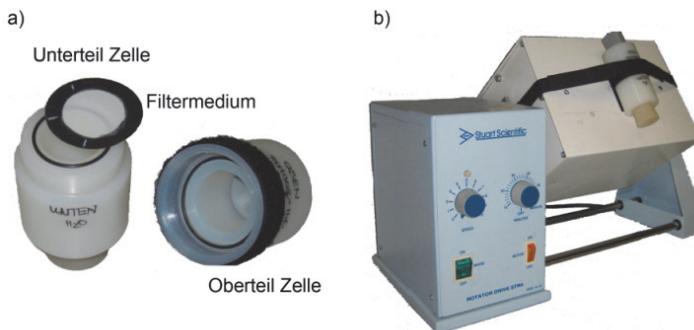


Abbildung 5-9: a) Zelle zur Kontaminierung mit Filtermedium, b) Zelle angebracht am Rotator

Der obere Teil der Kontaminierungszelle wurde mit Partikelsuspension befüllt. Nach Verschließen und Befestigung der Zelle am Rotator wurde er für eine definierte Zeitspanne betrieben.

5.4 Messtechnik

5.4.1 Fluoreszenzmikroskop

Die fluoreszierenden Partikel, die sich nach der Kontaminierung bzw. nach dem Reinigungsprozess auf dem Filtermedium abgelagert bzw. noch befanden, konnten mit einem Fluoreszenzmikroskop sichtbar gemacht werden. Der Einsatz der Fluoreszenz war in diesem Fall notwendig, um den Hintergrund (in unserem Fall die Struktur des Filtergewebes) mithilfe einer Bildbearbeitung zu entfernen, was die automatisierte Auszählung der Partikel mit ImageJ ermöglichte (siehe Abschnitt 7.1.1). Für die Aufnahmen kam das Fluoreszenzauflichtmikroskop BZ 8000 der Firma Keyence (Japan) zum Einsatz. In Abbildung 5-10 ist das Fluoreszenzmikroskop und sein Funktionsprinzip dargestellt.

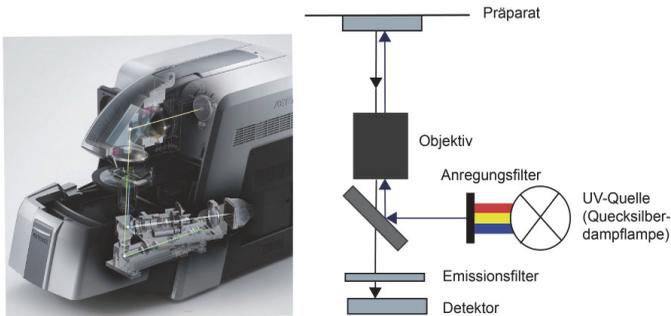


Abbildung 5-10: Fluoreszenzmikroskop (links) und Funktionsweise (rechts)

UV-Licht wird von einer UV-Quelle zu einem Anregungsfilter geleitet, der aus dem gesamten Wellenlängenspektrum den Bereich filtert, der für die Anregung des gewählten Fluochromes erforderlich ist. Danach trifft das Licht auf einen dichromatischen Spiegel, der die Aufgabe hat, das Anregungslicht vollständig zum Präparat hin zu reflektieren. Das vom Präparat emittierte Licht gelangt dann durch einen Emissionsfilter auf den Detektor. Der Emissionsfilter lässt nur den Wellenlängenbereich hindurch, der spezifisch für das verwendete Fluochrom ist. Somit sollen Reflexionen vom Anregungslicht am Präparat vermieden werden. Der Anregungsfilter, der dichromatische Spiegel und der Emissionsfilter sind genau aufeinander abgestimmt und in einer Einheit, dem soge-

nannten Fluoreszenzfilterwürfel, zusammengefasst. Der elektronische Objekt-Koordinatentisch mit X-Y-Z-Achse ermöglicht eine exakte und reproduzierbare Ausrichtung des Objektträgers. So konnte ein und dieselbe Stelle am Filtermedium vor und nach der Reinigung betrachtet und miteinander verglichen werden.

5.4.2 Fluoreszenzspektrometer

Für die Konzentrationsbestimmungen der Versuche mit der Verunreinigung Riboflavin bzw. Malzextrakt-Esculin (siehe Abschnitt 6) kam ein Fluoreszenzspektrometer der Firma Varian (Varian Eclipse) zum Einsatz. Sein Aufbau ist in Abbildung 5-11 dargestellt.

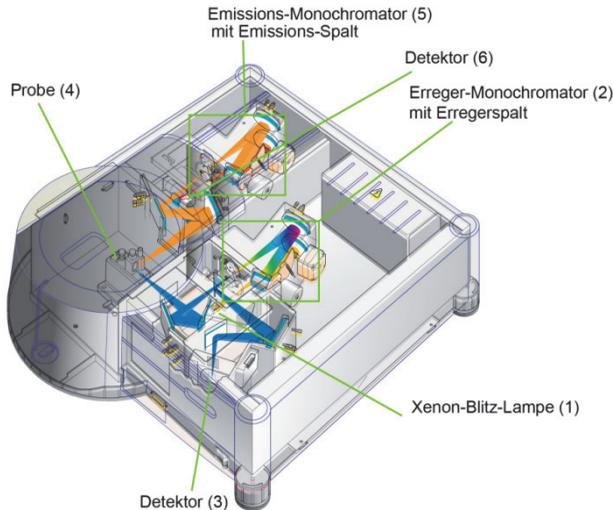


Abbildung 5-11: Funktionsweise und Strahlengang des Fluoreszenzspektrometers [107]

Die Fluoreszenzmessung erfolgt mit einer Erregerquelle, die 90° zum Emissions-Detektor aufgestellt ist. Als Erregerquelle dient eine Xenon-Blitzlampe (1) mit einer Pulsfrequenz von 80 Hz und einer maximalen Pulsdauer von 2 bis 3 μs . Das Licht trifft nun auf einen Monochromator (2), der die gewünschte Erregerwellenlänge aus dem Lichtspektrum isoliert. Dabei passiert das Licht den Erregerspalt, über den die Intensität und Auflösung des übermittelten Lichts kontrolliert werden kann. Anschließend wird das Licht mit Spiegeln auf einen Referenzdetektor und auf die Probe umgeleitet. Das von der Probe emittierte Licht gelangt zum Emissionsmonochromator (5), der zum Erregerstrahl um 90°

versetzt ist, um Hintergrundsignale zu eliminieren und Rauschen zu verringern. Der Emissionsmonochromator isoliert dabei die spezifische Emissionswellenlänge der Probe aus dem Lichtspektrum. Das Licht verlässt den Monochromator über den Emissions-Spalt und trifft letztendlich auf den Detektor (6), einen Photomultiplier. Einstellbare Parameter sind zum einen die Erregerwellenlänge und die Emissionswellenlänge der Probe, die Erreger- und Emissionsspaltweiten sowie die Spannung der Xenon-Blitz-Lampe. Für unterschiedliche Konzentrationen an Fluorochrom (in unserem Fall Riboflavin) in der Probe ergeben sich unterschiedliche Signalintensitäten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier Kalibriergeraden mit angepassten Parameterkombinationen (Erreger-, Emissionsspaltweite und Spannung) für den jeweiligen Konzentrationsbereich erstellt. Sie wurden angepasst, um sowohl einen linearen Zusammenhang zwischen Intensität und Konzentration als auch eine möglichst große Ausreizung des Intensitätsbereiches (Intensitätsbereich von 0 bis 1000) zu erreichen. Jede Kalibriergerade umfasste eine komplette Zehnerpotenz an Riboflavin-Konzentration.

Es wurde der Konzentrationsbereich von $1 \cdot 10^{-3}$ g/l und $1 \cdot 10^{-7}$ g/l abgedeckt. Im Anhang A sind die Kalibriergeraden für Riboflavin bzw. für die Malzextrakt-Esculin-Lösung dargestellt.

6 Kontinuierliche Reinigung einer löslichen Verunreinigung

In technischen Filtrationsprozessen können Verunreinigungen sowohl löslichen als auch unlöslichen Charakter aufweisen. Dieses Kapitel widmet sich vor allem der Reinigung von löslichen Verunreinigungen auf polymeren Filtergeweben. Diese Untersuchungen sind eine Weiterführung der Untersuchungen von Stahl [2], der sich hauptsächlich mit der Reinigung von metallischen Stützgeweben beschäftigte. Die Filtergewebe, die bei diesen Untersuchungen zum Einsatz kommen, sind blickdicht und weisen eine komplexere geometrische Struktur als Stützgewebe auf. Das Kapitel beschäftigt sich mit Reinigungsversuchen an sieben verschiedenen Filtergeweben (siehe Tabelle 4-2) und mit zwei verschiedene Arten von Verunreinigungen (Riboflavin und Malzextrakt). Zuerst erfolgt die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Kontaminierung der Filtermedien mit der jeweiligen Verunreinigungsart, bei der jeweils ein dünner Kuchen auf dem Filtermedium gebildet wird. Die Konzentrationsbestimmung der Verunreinigung kann durch Probenentnahme am Auslauf der Anlage zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Als Beurteilungskriterium der Reinigung kommt jedoch nicht die Konzentration der gemessenen Proben zum Einsatz, sondern die Reinigungsrate, die das Verhältnis zwischen Massenstrom an ausgetragener Verunreinigung und der kontaminierten Fläche beschreibt. Im weiteren Verlauf des Kapitels erfolgen Untersuchungen der Reinigungsfähigkeit von Filtermedien unterschiedlicher Webarten, unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse mithilfe des Modells des Stoffübergangs beschrieben. Mit einer Dimensionsanalyse kann ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflussfaktoren ermittelt werden, mit dem eine Vorhersage der experimentellen Reinigungsergebnisse möglich ist.

6.1 Vorgehensweise bei den Reinigungsversuchen

6.1.1 Kontaminierung der Gewebe

Die Verunreinigungen, mit denen die Versuche durchgeführt wurden, waren Riboflavin und Malzextrakt. Im Folgenden ist nun die jeweilige Kontaminierung beschrieben.

Die Kontaminierung des Riboflavins erfolgte in einer Kontaminierungseinheit, die nach dem Prinzip einer Drucknutsche funktioniert (siehe Abschnitt 5.3.1). Nach Einsetzen des Filtermediums in die modifizierte Milchröhrverschraubung (Abbildung 5-6) wurde eine übersättigte Riboflavin-Wasserlösung oberhalb des Filtergewebes eingefüllt und ein Druck von 0,4 bar eingestellt. Nach Bildung eines Filterkuchens auf dem Gewebe und nachdem kein Filtratstrom mehr detektierbar war, wurde das Gewebe aus der Kontaminierungseinheit herausgenommen und nach einer Trocknungszeit von 30 min bei 70°C im Trockenschrank in die Durchströmungsanlage eingebaut. Bei der Durchführung der Versuche war es besonders wichtig, vor jedem Versuch einen identischen Anfangszustand zu schaffen. Die Kontaminierung musste also reproduzierbar sein, um vergleichbare Bedingungen zu erzeugen. Da die Filtermedien jedoch eine unterschiedliche Porosität aufwiesen, variierten die Konzentrationen der Riboflavinlösungen je nach Gewebe. In Tabelle 6-1 sind die Kontaminationsbedingungen für das jeweilige Gewebe dargestellt. Das Volumen der Riboflavin-Wasser-Lösung, die zur Kontaminierung filtriert wurde, betrug bei allen Versuchen 30 ml. Die Kontaminierung der Gewebe mit Malzextrakt erfolgte in einem Vakuumfiltrationsgerät (siehe Abschnitt 5.3.2) bestehend aus einer Saugflasche, einer Vakuumpumpe und einer Keramikmembran. Das Gewebe wurde auf die Keramikmembran gelegt, die Esculin-Malzextrakt-Lösung vorsichtig aufgepinselt und danach durch Anlegen eines Vakuums durch das Gewebe filtriert.

Tabelle 6-1: Kontaminationsbedingungen für das jeweilige Gewebe bei 0,4 bar

Filtermedien	Konzentration in g/l
SK-22	2,6
K-27	3,3
TWL-25	3
STN-25	3
W-041	3,3

Dieses Vorgehen ist notwendig, um einen homogenen Film an Malzextrakt-Esculin auf dem Gewebe zu bilden. In Abbildung 6-1 ist für beide Verunreinigungsarten die Beladung des jeweiligen Filtermediums dargestellt. Aufgetragen ist die Beladung $m_{\text{Verunreinigung}}$ über dem jeweiligen Filtermedium. Die Kontaminierungsversuche wurden dabei für jedes dargestellte Filtermedium siebenmal wiederholt und jeweils die Beladung mit einer Präzisionswaage bestimmt. Um die Reproduzierbarkeit der jeweiligen Kontaminierung zu zeigen, sind zusätzlich die Standardabweichungen aufgetragen.

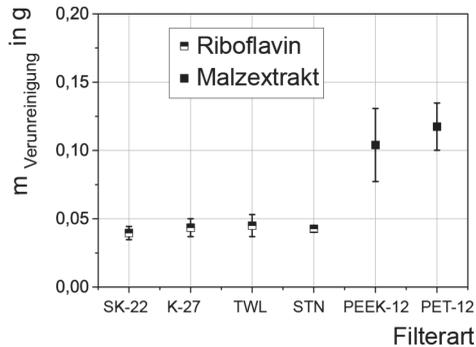


Abbildung 6-1: Vorversuche zur Kontaminierung

Es ist ersichtlich, dass die Kontaminierung mit Riboflavin für alle vier untersuchten Filtermedien sehr reproduzierbar ist und dass die Anfangsbeladung des Gewebes zwischen 40 und 45 mg liegt. Die größte Standardabweichung, die bei der Kontaminierung mit Riboflavin bestimmt wurde, lag bei +/- 15 %. Bei Betrachtung der Standardabweichungen der Kontaminierungsversuche mit Malzextrakt wird deutlich, dass hier viel größere Standardabweichungen auftreten. Die maximal gemessene Standardabweichung beträgt beim Malzextrakt +/- 25 %. Das kann sich natürlich nachteilig auf die Vergleichbarkeit der Versuche auswirken. Ebenso ist deutlich erkennbar, dass eine viel größere Masse an Malzextrakt auf dem jeweiligen Gewebe zurückbleibt, was an der höheren Viskosität des Malzextraktes liegt.

6.1.2 Experimentelle Bestimmung der Reinigungsrate und des Reinigungsverhältnisses

In der Literatur [35, 40, 41, 49] erfolgt die Betrachtung der Reinigung mithilfe der Reinigungsrate (beispielsweise aufgetragen über der Zeit), weshalb in den folgenden Untersuchungen ebenfalls auf diese Größe zurückgegriffen wird (siehe Gleichung 2-1). Die Bestimmung der Reinigungsrate erfolgt durch Probenentnahme am Auslass der Anlage zu definierten Zeitpunkten. Mithilfe des Fluoreszenzspektrometers ist es durch vorherige Kalibrierung des Gerätes möglich, die Probenkonzentration zu bestimmen. Mit der Konzentration c_{kont} und dem Volumenstrom \dot{V}_{Fluid} , mit dem das Filtermedium durchströmt wird, lässt sich dann der Massenstrom \dot{M}_{kont} an ausgetragener Verunreinigung berechnen (siehe Gleichung 6-1):

$$\dot{M}_{kont} = c_{kont} \cdot \dot{V}_{Fluid} \cdot \quad 6-1$$

Durch Einsetzen in Gleichung 2-1 ergibt sich dann die Reinigungsrate R_R . Die kontaminierte Fläche ist hierbei die Hälfte der Oberfläche des jeweiligen Gewebes, da die Fasern aufgrund der Vorgehensweise bei der Kontaminierung nicht komplett von der Verunreinigung umgeben sind. Die Berechnungen dazu sind im Anhang C.1 aufgeführt.

Bei dieser Auswertemethodik handelt es sich um eine indirekte Methode, da die Beurteilung der Reinigungsfähigkeit nicht direkt durch Auswerten des Gewebes, sondern indirekt durch Untersuchung des Spülwassers erfolgt. Kriterium für das Ende der Messung ist der Zeitpunkt, bei dem keine Verunreinigung mehr im Spülwasser nachgewiesen werden kann. Da im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen von Geweben unterschiedlicher Webarten erfolgen sollen und das Hohlraumvolumen des Gewebes, das dabei durchströmt wird, für jede Gewebeart unterschiedlich ist, ist es für den Vergleich der Reinigungsergebnisse notwendig, das Volumen von verbrauchtem Reinigungsfluid auf das Hohlraumvolumen des Gewebes zu beziehen. Das Verhältnis $Q_{Reinigung}$ stellt diesen Zusammenhang in Gleichung 6-2 dar:

$$Q_{Reinigung} = \frac{V_{Fluid}}{V_{Hohlraum, Gewebe}} \cdot \quad 6-2$$

Dieses Verhältnis ist angelehnt am Waschverhältnis bei der Filterkuchenwaschung. Somit ist es möglich, die Reinigung von Geweben unterschiedlichen Hohlraumvolumina miteinander zu vergleichen. Die Berechnung des Hohlraumvolumens des Gewebes ist mit Gleichung 6-3 möglich:

$$V_{\text{Hohraum,Gewebe}} = V_{\text{gesamt}} - V_{\text{Faden}} \quad 6-3$$

Hierbei ist V_{gesamt} das komplette Volumen des Gewebeausschnittes und V_{Faden} das Fadenvolumen des Gewebes. In Abschnitt 4.3.2 sind die Berechnungen für die jeweilige Webart aufgeführt.

6.2 Ergebnisse lösliche Verunreinigung

Im folgenden Abschnitt sind nun die Ergebnisse der Reinigungsfähigkeit löslicher Verunreinigungen dargestellt. Bestandteil ist dabei die genauere Betrachtung der Reinigungskinetik, um die unterschiedlichen Phasen der Reinigung, wie sie auch in der Literatur zur Rohrreinigung zu finden sind, erkennen zu können. Weiterhin werden die Versuchsergebnisse auf das Konzept des Stoffübergangs übertragen und mit einer Dimensionsanalyse wird versucht, den Stoffübergangskoeffizienten nicht nur experimentell, sondern auch theoretisch zu bestimmen.

6.2.1 Reinigungskinetik

Die Reinigungsversuche erfolgten mit zwei verschiedenen Kontaminationsarten (Riboflavin und Malzextrakt). Die eingesetzten Filtermedien waren PET-(SK)-22 und PET-(K)-27 für das Riboflavin und PET-(SK)-12 und PEEK-(SK)-12 für die Verunreinigung Malzextrakt (siehe 4.3.3). Im Folgenden sind die Reinigungskinetiken der beiden Verunreinigungsarten beschrieben. Alle Versuche wurden mindestens dreimal wiederholt.

6.2.1.1 Reinigungskinetik mit der Verunreinigung Riboflavin

Abbildung 6-2 zeigt die Reinigungskinetik für das Filtermedium PET-22. Aufgetragen ist die Reinigungsrate R_R über der Prozesszeit t . Im dargestellten Diagramm können vier verschiedene Phasen, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird, unterschieden werden. Ebenso ist im Kurvenverlauf eine Analogie zur Rohrreinigung nach Welchner erkennbar (vgl. Abbildung 2-1 rechts).

- **Phase 1: Kuchenabwurf (0 s-42 s)**

Hier ist ein starker Abfall der Reinigungsrate zu beobachten. Es ist anzunehmen, dass dieser starke Abfall der Reinigungsrate durch den Abwurf von Kuchenfraktionen des Riboflavins verursacht wird.

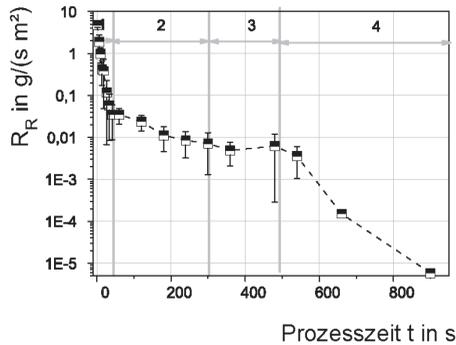


Abbildung 6-2: Reinigingskinetik Riboflavin, Filtermedium: PET- 22, $v = 0,1$ m/s

- **Phase 2: Flockenaustrag** (42 s–320 s)

In dieser Phase ist der Abfall der Reinigungsrate etwas geringer als in Phase 1. Das liegt daran, dass ungelöste Bestandteile an Riboflavin, die sich noch auf dem Filtermedium befinden, in dieser Phase von der Filteroberfläche abgelöst und flockenartig ausgetragen werden. In Phase 1 und 2 dominieren vor allem die konvektiven Stofftransportmechanismen.

- **Phase 3: Konstanter Massentransport** (320 s–580 s)

In dieser Phase kann eine relativ konstante Reinigungsrate detektiert werden. Nachdem der Kuchen vollständig von der Filteroberfläche entfernt ist, befindet sich um die Fäden des Filtergewebes ein homogener Film aus Riboflavin, der komplett gelöst vorliegt und der während Phase 3 konstant durch die Strömung abgetragen wird. Diese Phase wird auch als Phase des konstanten Massentransports bezeichnet. Hier dominieren die diffusiven Stofftransportmechanismen zwischen umgebendem Fluid und Verunreinigung. In dieser Phase sind keinerlei Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit erkennbar, da der Stoffübergang nur zwischen Verunreinigung und umgebendem Fluid stattfindet. Jedoch spielen die Einflüsse der Geometrie des umströmten Körpers (in unserem Fall das Gewebe) eine wichtige Rolle. Dieser Bereich des konstanten Massentransports wurde auch von Welchner [39], Xin [41] und Hofmann [38] bei der Rohrreinigung beobachtet. In dieser Phase wird auch der Stoffübergangskoeffizient β bestimmt. Die Dauer dieser Phase ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Bei hohen Geschwindigkeiten kann die Phase kaum identifiziert werden. Jedoch ist

der Übergang zwischen Phase 2 und 3 sehr gut zu sehen. Daher wird bei den Versuchen, bei denen die konstante Phase nicht eindeutig zu erkennen ist, der Stoffübergangskoeffizient β mithilfe des letzten Datenpunktes in Phase 2 bestimmt.

- **Phase 4: Zwickelabtrag** (580 s-900 s)

In der letzten Phase sinkt die Reinigungsrate wiederum. Der homogene Riboflavin-Film, der in Phase 3 vorhanden war, verschwindet mit steigender Spüldauer und es bleiben nur Filmreste an vereinzelt Stellen des Filtermediums zurück. Die Detektionsgrenze von Riboflavin liegt bei einer Konzentration von $1 \cdot 10^{-7}$ g/l was einer Reinigungsrate von $5,9 \cdot 10^{-6}$ g/(s·m²) entspricht. Für das Filtermedium PET-22 ist diese Detektionsgrenze nach einer Spüldauer von 900 s erreicht. In dieser Phase können die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit erkannt werden. Je rauer die Oberfläche ist, desto tiefer lagern sich die Riboflavinmoleküle in die Rauheitsspitzen ein, und desto schlechter sind sie von der Strömung zu erfassen und abzutragen. Erst wenn die diffusiven Vorgänge abgeschlossen sind, ist das Gewebe sauber. Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 6.2.3 näher eingegangen.

Für das Filtermedium PET-K-27 können die gleichen Tendenzen beobachtet werden (siehe Abbildung 6-3).

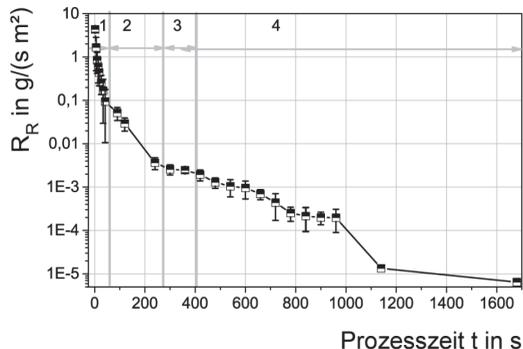


Abbildung 6-3: Reinigungsverhalten Riboflavin, Filtermedium PET-K-27,
 $v_{\text{Pore}} = 0,12$ m/s

Beim Vergleich mit dem Filtermedium PET-SK-22 fällt auf, dass der Startpunkt von Phase 3 des Filtermediums PET-K-27 zur gleichen Zeit auftritt wie beim PET-SK-22 (bei 380 s) und dass die konstante Reinigungsrate (siehe Phase 3) etwas kleiner ist (PET-SK-22-Filter: $5,6 \cdot 10^{-3}$ g/(s·m²), K-Filter: $2,5 \cdot 10^{-3}$ g/(s·m²)).

Es ist ersichtlich, dass das Filtermedium PET-SK-22 eine bessere Reinigungsfähigkeit aufweist als das Filtermedium PET-K-27 (Detektionsgrenze war nach 1680 s für das PET-K-27 und nach 900 s für das Filtermedium PET-SK-22 erreicht). Aufgrund der Beobachtungen und aufgrund von früheren Ergebnissen [38] kann die Aussage getroffen werden, dass der Erfolg der Reinigung maßgeblich von der Höhe der Reinigungsrate in Phase 3 abhängig ist. Die Reinigungsrate in Phase 3 ist somit ein Kriterium für das Reinigungsverhalten.

6.2.1.2 Reinigungskinetik mit der Verunreinigung Malzextrakt

In Abbildung 6-4 ist jeweils die Reinigungskinetik der Filtermedien PEEK-SK-12 und PET-SK-12 für die Verunreinigung Malzextrakt dargestellt.

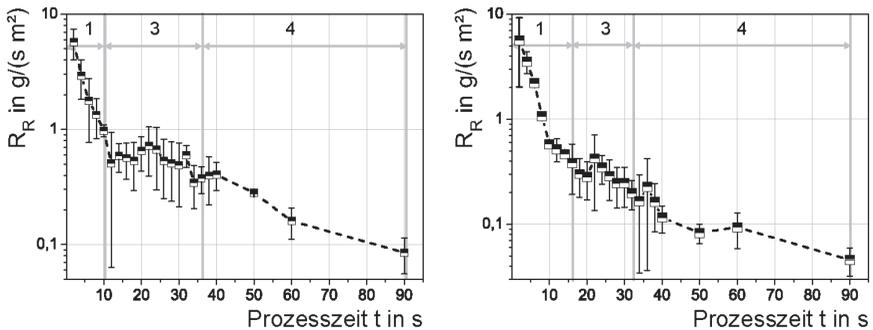


Abbildung 6-4: Reinigungskinetik mit Malzextrakt-Esculin, links: PEEK-SK-12, $v = 0,02$ m/s, rechts PET-SK-12, $v = 0,02$ m/s

Die Reinigungskinetik mit Malzextrakt als Verunreinigung weist ähnliche Tendenzen wie die Reinigungskinetik mit Riboflavin auf. Bei beiden dargestellten Filtermedien sind insgesamt drei Abschnitte zu erkennen. In der ersten Phase wird ein Großteil der homogenen Malzextrakt-Esculin-Schicht auf der Oberfläche heterogen vom Filtermedium abgetragen. Daher ist in Abbildung 6-4 ein Abfall der Reinigungsrate zu beobachten. Die zweite Phase, die für die Verunreinigungsart Riboflavin beobachtet wurde (siehe Phase 2, Abbildung 6-3) ist beim Malzextrakt nicht vorhanden. Das kann an den großen Standardabweichungen der gemessenen Reinigungsraten und an einem anderen Lösungsverhalten des Malzextraktes liegen. Der Kuchen des Malzextraktes löst sich nicht flockenartig wie das Riboflavin ab, sondern es löst sich sofort im Reinigungsfluid. In der nächsten Phase (Phase 3 in Abbildung 6-4 links und rechts) ist eine konstante Reinigungsrate zu erkennen. In dieser Phase befindet sich nur noch

ein homogener Film an Malzextrakt um die Filterfäden, der konstant mit der Strömung ausgetragen wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Reinigungskinetik von Malzextrakt und Riboflavin ähnlich sind. Jedoch ist ersichtlich, dass Riboflavin als Verunreinigung besser für eine Beurteilung der Reinigung geeignet ist, da dort geringere Standardabweichungen auftreten. Deshalb erfolgten alle weiteren Versuche mit Riboflavin als Verunreinigung.

6.2.2 Einfluss Strömungsgeschwindigkeit

Um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Reinigung der Filtermedien zu untersuchen, erfolgten Versuche mit drei verschiedenen Porengeschwindigkeiten (0,05 m/s, 0,19 m/s und 0,38 m/s). Exemplarisch sind hier die Ergebnisse des Filtermediums PET-K-27 dargestellt (Abbildung 6-5). Aufgetragen ist die Reinigungsrate R_R über der Prozesszeit (Abbildung 6-5 links) und über dem Volumen an Reinigungsfluid $V_{\text{Reinigung}}$ (Abbildung 6-5 rechts).

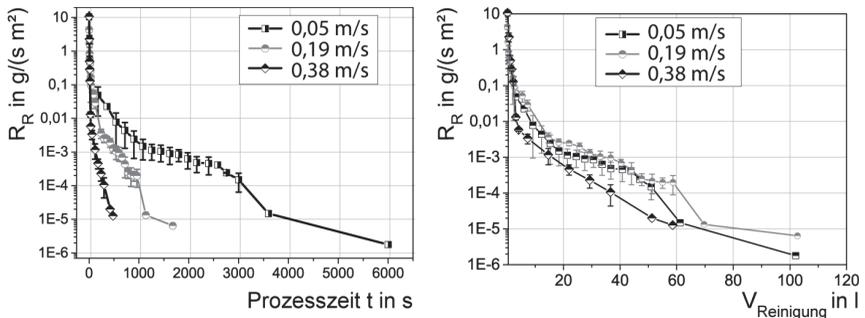


Abbildung 6-5: Einfluss Strömungsgeschwindigkeit, Filtermedium PET-K-27

Aus der linken Abbildung ist ersichtlich, dass mit steigender Strömungsgeschwindigkeit das Reinigungsergebnis zu einem früheren Zeitpunkt erreicht ist. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,19 m/s ist die Detektionsgrenze schon nach 480 s erreicht, während bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,05 m/s der gleiche Zustand erst nach 6000 s eintritt. Somit ist eine Zeiteinsparung um den Faktor 12,5 bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit um den Faktor 8 möglich.

Im rechten Diagramm ist die Reinigungsrate über dem verbrauchten Volumen an Reinigungsfluid aufgetragen. Es ist für die Strömungsgeschwindigkeiten von 0,05 m/s und 0,19 m/s das gleiche Volumen an Reinigungsfluid notwendig, um die Detektionsgrenze zu erreichen. In diesem Geschwindigkeitsbereich ist einzig

das durchströmende Volumen für das Reinigungsergebnis ausschlaggebend. Die höheren Strömungskräfte haben keinen Einfluss auf das Reinigungsergebnis. Das bedeutet, dass bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,05 m/s und 0,19 m/s der Einfluss der Diffusion dominierend gegenüber dem der Strömungskräfte ist. Bei der Strömungsgeschwindigkeit von 0,38 m/s ist die Detektionsgrenze schon nach 60 l erreicht. Hier scheinen neben den diffusiven Vorgängen auch die höheren Strömungskräfte das Reinigungsergebnis zu beeinflussen. Es fällt zudem auf, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,38 m/s keine konstante Reinigungsrate erkennbar ist. Es wird angenommen, dass Phase 3 bei der hohen Geschwindigkeit zu kurz ist, um mit der durchgeführten Probenahme detektiert werden zu können.

6.2.3 Vergleich Oberflächenbeschaffenheit der Filtermedien

Um die Art der Oberflächenbeschaffenheit verschiedener Filtermedien auf ihre Reinigungsfähigkeit zu untersuchen, erfolgten Versuche mit drei unterschiedlich behandelten Filtermedien. Dabei handelte es sich um PRD-Gewebe aus Polyethylenterephthalat. Ein Filtermedium war unbehandelt (PET-W-42), eines kalandriert (PET-K-27) und eines super kalandriert (PET-SK-22). Aufgrund ihrer unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit weisen die drei genannten Filtermedien auch unterschiedliche Rauheiten auf.

Die Messung der Oberflächenrauheit erfolgte mithilfe eines Laser-Scanning-Mikroskops der Firma Keyence (Japan). Die Software dieses Mikroskops ermöglichte es, die Welligkeit der gewebten Fasern zu bestimmen und aus der Rauheitsberechnung herauszurechnen. Aufgrund der Struktur des Gewebes wurden Linienrauigkeiten nach *ISO 4287 1997* an mindestens 12 verschiedenen Stellen bestimmt. In der folgenden Abbildung 6-6 ist der vermessene Gewebeausschnitt bildlich dargestellt.

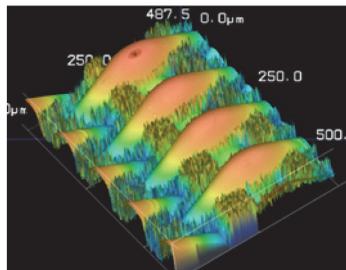


Abbildung 6-6: LSM-Aufnahme des PET-W-41

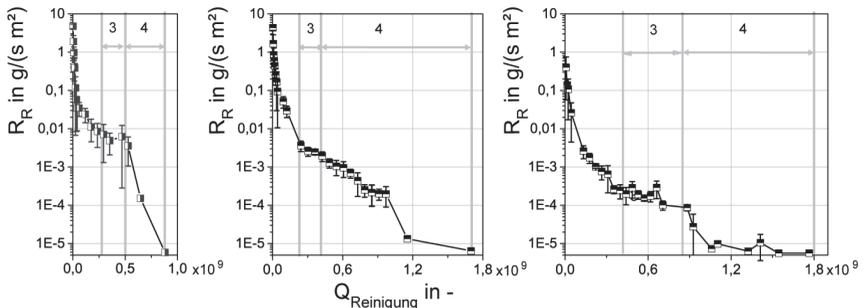
Es ist sehr starkes Rauschen genau an den Stellen erkennbar, an denen sich die Schussfäden unter den Kettfäden hindurchwinden. Leider war es nicht möglich, diese Stellen mithilfe des vorhandenen Mikroskops besser aufzulösen. Die Messung der Linienrauheit erfolgte somit an der Oberfläche der Schussfäden, da hier nur ein sehr geringes Rauschen aufgetreten ist.

In Tabelle 6-2 sind die gemessenen Rauheitswerte R_a und R_q aufgeführt. Die Messergebnisse zeigen, wie aufgrund der jeweiligen Vorbehandlung des Gewebes zu erwarten war, dass das superkalandrierte Gewebe (PET-SK-22) die geringste Rauheit und das unbehandelte Gewebe (PET-W-41) die höchsten Rauheitswerte aufweist. Durch die Vorbehandlung der Gewebe ändern sich nicht nur die Oberflächeneigenschaften, sondern auch die Geometrieverhältnisse des Gewebes (Dicke l_{Dicke} , l_d , Durchmesser von Faden 1 und 2: d_1 und d_2 , Teilung t).

Tabelle 6-2: Rauheitswerte der drei untersuchten Filtermedien

Filterbezeichnung	Rauheit R_a in nm	Rauheit R_q in nm
PET-SK-22	33 ± 8	44 ± 9
PET-K-27	47 ± 10	59 ± 12
PET-W-41	85 ± 22	109 ± 29

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie des Gewebes auf das Reinigungsverhalten ist in diesem Zusammenhang auch von großem Interesse. Deshalb ist in Abbildung 6-7 die jeweilige Reinigungskinetik (Reinigungsrate R_R aufgetragen über dem Reinigungsverhältnis $Q_{Reinigung}$) der untersuchten Filtermedien dargestellt.



**Abbildung 6-7: links: PET-SK-22, mitte: PET-K-27, rechts: PET-W-41,
 $v_{Pore} = 0,19 \text{ m/s}$**

Zusätzlich sind in allen drei Diagrammen Phase 3 (Phase des konstanten Massentransportes) und Phase 4 zur besseren Veranschaulichung gekennzeichnet. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Pore war bei allen Versuchen konstant und lag bei 0,19 m/s. Aus den Verläufen wird deutlich, dass das Filtermedium PET-SK-22 das beste Reinigungsergebnis liefert (Detektionsgrenze ist schon bei einem Reinigungsverhältnis $Q_{\text{Reinigung}}$ von $0,88 \cdot 10^9$ erreicht). Dagegen besitzt das Filtermedium PET-W-41 das schlechteste Reinigungsverhalten, denn die Detektionsgrenze ist erst bei einer Reinigungsverhältnis $Q_{\text{Reinigung}}$ von $1,8 \cdot 10^9$ erreicht. Es ist ersichtlich, dass der Abfall der Reinigungsrate in Phase 4 bei PET-SK-22 sehr viel größer ist als bei PET-K-27 und PET-W-41 (PET-W-41 hat hier die geringste negative Steigung der Reinigungsrate).

In Tabelle 6-3 sind die Werte der Steigungen in Phase 4 für die einzelnen Gewebe zur besseren Veranschaulichung dargestellt.

Tabelle 6-3: Steigungen der Reinigungskurven der drei Filtergewebe

Filterbezeichnung	Steigung in Phase 4 in $g/(s \cdot m^2)$
	$\Delta R_R / \Delta Q_{\text{Reinigung}}$
PET-SK-22	$-1,63 \cdot 10^{-11}$
PET-K-27	$-0,19 \cdot 10^{-11}$
PET-W-41	$-0,028 \cdot 10^{-11}$

Wie bereits erwähnt, kann für den Verlauf der Reinigungsrate in Phase 4 die Rauheit der Oberfläche verantwortlich sein. Die einzelnen Riboflavin-Moleküle (Größe $15 \text{ \AA} = 1,5 \text{ nm}$) setzen sich in den Rauheitsspitzen fest und je tiefer diese sind, desto schwerer sind die Moleküle von der Strömung erreichbar und desto länger dauert es, bis die Detektionsgrenze erreicht und die diffusiven Vorgänge abgeschlossen sind. Somit scheint es einen Zusammenhang zwischen der Rauheit und dem Abfall der Reinigungsrate in Phase 4 des jeweiligen Filtermediums zu geben (vergleiche Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3). Es ist ersichtlich, dass mit steigender Rauheit der Abfall der Reinigungsrate in Phase 4 abnimmt. Bei Betrachten der Reinigungskinetiken in Phase 3 fällt auf, dass die konstante Reinigungsrate der drei Gewebe der gleichen Tendenz folgt wie die Detektionsgrenze. Das PET-SK-22 weist die höchste konstante Reinigungsrate auf, das PET-K-27, die zweithöchste und das PET-W-41 die geringste ($R_{R, SK-22} = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(s \cdot m^2)$, $R_{R, K-27} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(s \cdot m^2)$, $R_{R, W-42} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ g}/(s \cdot m^2)$). Dieser Sachverhalt kann jedoch nicht in der Rauheit der Oberflächen begründet liegen, da in Phase 3 noch ein dünner Film Riboflavin um die Fasern liegt und

dabei nur eine Wechselwirkung zwischen Reinigungsfluid und Riboflavin und nicht zwischen Reinigungsfluid und Oberfläche auftritt. Die unterschiedlichen Reinigungsraten in dieser Phase können deshalb nur in der unterschiedlichen Filtergeometrie begründet liegen. Charakteristisch für die Filtergeometrie sind die Parametern l_d , d_1 , d_2 und t . Sie wurden bereits in Abschnitt 4.3.2 genauer dargestellt. In Abschnitt 6.3 erfolgt die Einführung eines Geometrieparameters, der diese Zusammenhänge berücksichtigt.

6.2.4 Vergleich der Webart der Filtermedien

Um den Einfluss der Webart auf das Reinigungsergebnis genauer zu untersuchen, erfolgten Experimente mit zwei Filtermedien unterschiedlicher Webart. Das eine besitzt eine STN-Bindung (PP-STN-25) und das zweite eine TWL-Bindung (PP-TWL-25). Sie bestehen beide aus dem Material Polypropolyen. Ihre Eigenschaften sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Die Strömungsgeschwindigkeit für das jeweilige Filtermedium wurde so angepasst, dass eine Porengeschwindigkeit von $0,12 \text{ m/s}$ vorlag. Abbildung 6-8 zeigt die Versuchsergebnisse. Zur besseren Veranschaulichung sind hier noch Phase 3 und 4 des jeweiligen Gewebes dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass das STN-Gewebe ein besseres Reinigungsverhalten aufweist als das TWL-Gewebe, denn beim STN-25 wird die Detektionsgrenze bei einer Reinigungsrate von $0,83 \cdot 10^9$ erreicht, während die Detektionsgrenze beim TWL-25 erst bei einer Reinigungsrate von $1,2 \cdot 10^9$ erreicht ist.

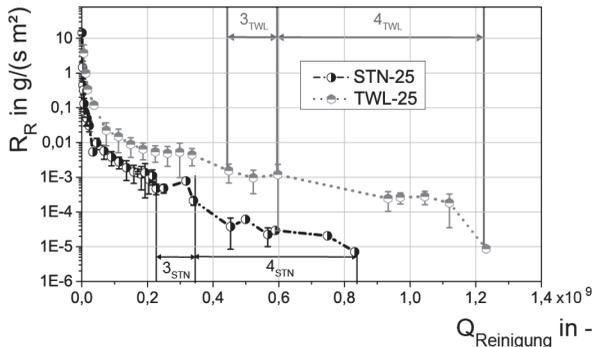


Abbildung 6-8: Vergleich Webart, $v_{\text{Pore}} = 0,12 \text{ m/s}$

Da beide Gewebe aus demselben Material sind und beide die gleiche Oberflächenbeschaffenheit haben, ist davon auszugehen, dass beide Gewebe auch die

gleiche Rauheit besitzen. Rauheitsmessungen (siehe Tabelle 6-4) bestätigten diese Annahme.

Tabelle 6-4: Rauheitswerte des STN- und TWL-Gewebes

Filterbezeichnung	Rauheit R_a in nm	Rauheit R_q in nm	Steigung in $g/(s \cdot m^2)$
			$\frac{\Delta R_R}{\Delta Q_{\text{Reinigung}}}$
PP-STN-25	50 ± 16	70 ± 21	$-2,8 \cdot 10^{-12}$
PP-TWL-25	$67 \pm$	81 ± 22	$-2,0 \cdot 10^{-12}$

Die Messungen erfolgten mit der gleichen Methode wie für die PET-Gewebe. Ebenso erfolgte die Bestimmung der Kennliniensteigung in Phase 4. Wie aufgrund der sehr nahe beieinanderliegenden Rauheitswerte des TWL- und STN-Filters zu erwarten war, liegen auch die Steigungen in dieser Phase recht nahe beieinander (siehe letzte Spalte der Tabelle).

Ein Vergleich der Reinigungsraten in der Phase 3 liefert ähnliche Zusammenhänge. Hierbei ist die Reinigungsrate des STN-Gewebes höher als die Reinigungsrate des TWL-Gewebes ($R_{STN} = 1,2 \cdot 10^{-3} g/(s \cdot m^2)$ und $R_{TWL} = 1,0 \cdot 10^{-3} g/(s \cdot m^2)$). Dieser Unterschied ist in der Geometrie des umströmten Gewebes begründet. Je mehr Umschlingungen vorhanden sind, desto mehr Stellen existieren, an denen die Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Wandschubspannungen sehr stark reduziert werden (vergleiche Strömungsablösung bei der Zylinderumströmung [97] und bei der Durchströmung von Stützgeweben [66]) und bei denen somit ein geringerer Stoffübergang stattfindet. Wie aus Abschnitt 4.3.2 ersichtlich ist, weist das TWL-Gewebe viel mehr Umschlingungen als das STN-Gewebe auf, was sich in einer schlechteren Reinigungsfähigkeit des TWL-Gewebes widerspiegelt. Um diesen Geometrieinfluss berücksichtigen zu können, ist es notwendig, die Anzahl der Umschlingungen pro betrachtete Fläche miteinfließen zu lassen. Dies erfolgt im folgenden Abschnitt (6.3) mithilfe der Sherwood-Zahl.

6.3 Anpassung des Stoffübergangskonzepts an die Ergebnisse

Beim Konzept des Stoffübergangs spielt die Sherwood-Zahl eine große Rolle. Hofmann [38] wendete das Konzept des Stoffübergangs auf den Reinigungsprozess für Rohrleitungen an. Für die Beschreibung des Reinigungsprozesses benutzte er drei Kennzahlen: die Sherwood-Zahl, die Schmidt-Zahl und die Reynolds-Zahl. Die Sherwood-Zahl ermöglicht neben dem Vergleich der Reinigung von Rohren unterschiedlicher Geometrien auch den Vergleich der Reinigbarkeit von Filtermedien mit verschiedenen Verschmutzungsarten (für unterschiedliche Geometrien ändert sich die charakteristische Länge und die Verschmutzungsart beeinflusst den Diffusionskoeffizienten). In diesem Abschnitt wird nun diese Vorgehensweise von Hofmann auch auf die Reinigung von Filtermedien angewendet. Dabei ist es sinnvoll, die Geometrieeigenschaften (Bindungsart) der Gewebe mithilfe der charakteristischen Länge zu beschreiben. Wie im vorigen Abschnitt klar wurde, hängt das Reinigungsergebnis sehr stark von der Bindungsart des Gewebes ab. Je mehr Umschlingungen pro betrachtete Fläche auftreten, desto mehr kritische Reinigungsstellen sind vorhanden und desto schlechter ist folglich das Reinigungsergebnis. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die charakteristische Länge für gewebte Strukturen folgendermaßen formuliert:

$$l_{\text{Gewebe}} = \frac{A_{\text{betrachtet}}}{n \cdot l_d} \quad 6-4$$

Hier ist $A_{\text{betrachtet}}$ die Fläche des betrachteten Bereiches und n die Anzahl der auftretenden Umschlingungen der Länge l_d . Je mehr Umschlingungen ein Gewebe besitzt, desto kleiner ist die charakteristische Länge l_{Gewebe} . Kleine charakteristische Längen bedeuten eine große Anzahl an Umschlingungen und demzufolge auch eine schlechtere Reinigungsfähigkeit als große charakteristische Längen. Im Folgenden sind die Berechnungen der charakteristischen Längen für die Gewebe PRD, TWL und STN dargestellt (Gleichung 6-5, 6-6 und 6-7).

$$l_{\text{PRD}} = \frac{2 \cdot d_1 \cdot h \cdot t}{2 \cdot l_d} \quad 6-5$$

$$l_{\text{TWL}} = \frac{2 \cdot d_1 \cdot h \cdot t}{4 \cdot l_d} \quad 6-6$$

$$l_{STN} = \frac{2 \cdot d_1 \cdot h \cdot t}{4 \cdot l_d} \quad 6-7$$

Aus Abbildung 4-5, Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 ist zu erkennen, dass die Anzahl der Umschlingungen der einzelnen Gewebearten folgende Werte annehmen: $n_{PRD} = 1$ und $n_{TWL} = n_{STN} = 4$.

Der Stoffübergangskoeffizient β lässt sich nach Umstellung von Gleichung 3-23 mit

$$\beta = \frac{\dot{M}_{kont}}{A_{kont} \cdot \Delta c} = \frac{R_R}{A \cdot (c_{fluid} - c_{filter})} \quad 6-8$$

berechnen. Hierbei ist \dot{M}_{kont} der Massenstrom an Verunreinigung, A_{kont} die kontaminierte Fläche R_R die Reinigungsrate in der konstanten Phase und Δc die Konzentrationsdifferenz an Verunreinigung zwischen Oberfläche und Fluid. Die Sherwood-Zahl lässt sich mithilfe dieser Werte und unter Kenntnis des Diffusionskoeffizienten $D_{verschmutzung}$ berechnen:

$$Sh = \frac{\beta \cdot l_{Gewebe}}{D_{verschmutzung}} \quad 6-9$$

In Tabelle 6-5 ist die konstante Reinigungsrate, der Konzentrationsgradient zwischen Filteroberfläche und Reinigungsmedium, die charakteristische Länge, der Stoffübergangskoeffizient β und die experimentell ermittelte Sherwood-Zahl Sh aufgelistet.

Tabelle 6-5: Übersicht über die Stoffübergangskoeffizienten und die Sherwood-Zahlen der untersuchten Gewebe

Filtermedien	Konst. Reinigungsrate in g/(sm ²)	Konzentrationsgradient in g/l	Charakteristische Länge in m	β in m/s	Sh-Zahl
SK-22 (0,1 m/s)	6,7 · 10 ⁻³	6,5 · 10 ⁻²	1,2 · 10 ⁻⁴	1,0 · 10 ⁻⁴	12
K-27 (0,11 m/s)	2,5 · 10 ⁻³	6,5 · 10 ⁻²	1,1 · 10 ⁻⁴	3,9 · 10 ⁻⁵	4,4
W-41 (0,11 m/s)	2,1 · 10 ⁻⁴	6,5 · 10 ⁻²	8,5 · 10 ⁻⁵	3,2 · 10 ⁻⁶	0,3
TWL-25 (0,07 m/s)	1,0 · 10 ⁻³	6,5 · 10 ⁻²	3,4 · 10 ⁻⁴	1,6 · 10 ⁻⁵	5,4
STN-25 (0,07 m/s)	1,2 · 10 ⁻³	6,5 · 10 ⁻²	7,0 · 10 ⁻⁴	1,8 · 10 ⁻⁵	12,8

Die Fadendurchmesser zur Berechnung der Mantelfläche der Filtermedien wurden lichtmikroskopisch vermessen. Weiterhin wurde für die Berechnungen angenommen, dass in Phase 3 der Reinigungskinetik die Konzentration an Riboflavin an der Fadenoberfläche der Sättigungskonzentration entspricht (Sättigungskonzentration Riboflavin $c_{\text{Riboflavin}} = 0,065 \text{ g/l}$). Zur besseren Veranschaulichung sind die Ergebnisse aus Tabelle 6-5 in Abbildung 6-9 dargestellt. Aufgetragen ist der Stoffübergangskoeffizient β (graue Datenpunkte) bzw. die charakteristische Länge l_{Gewebe} (schwarze Datenpunkte) über der Sherwood-Zahl Sh für alle fünf untersuchten Filtermedien.

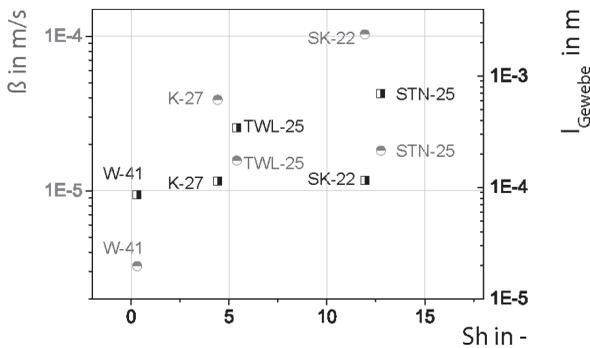


Abbildung 6-9: Vergleich der Stoffübergangskoeffizienten, charakteristischen Längen und Sherwoodzahlen der einzelnen Filtermedien

Das Diagramm verdeutlicht, dass der Stoffübergangskoeffizient β (bzw. die Reinigungsrate R_R) nicht als Vergleichskriterium unterschiedlicher Gewebearten bei der Reinigung dienen kann.

Dies wird beim Vergleich von $\beta_{\text{SK-22}}$ mit $\beta_{\text{STN-25}}$ bestätigt. Das Filtermedium SK-22 besitzt einen größeren Stoffübergangskoeffizienten als das Filtermedium STN-25 ($\beta_{\text{SK-22}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$; $\beta_{\text{STN-25}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$). Beim Betrachten der Reinigungskinetik der beiden Gewebe (Abbildung 6-7 links und Abbildung 6-8 schwarze Kurve) fällt jedoch auf, dass das STN-25-Gewebe eine bessere Reinigungsfähigkeit besitzt als das SK-22-Gewebe, denn die Nachweisgrenze ist bei dem STN-25-Gewebe schon bei einem Reinigungsverhältnis von $0,83 \cdot 10^9$ erreicht, während sich für das SK-22 ein Reinigungsverhältnis von $0,88 \cdot 10^9$ ergibt.

Der Grund hierfür liegt – wie bereits kurz angerissen – daran, dass bei der Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten β keinerlei Informationen über die Webart mit eingehen. Es ist lediglich das Verhältnis zwischen ausgetragener

Massenstrom an Riboflavin, der Filterfläche und dem Konzentrationsunterschied zwischen Filtergewebe und umströmendem Fluid. Deshalb ist es sinnvoll, zum Vergleich von Geweben verschiedener Konstruktionen die Sherwood-Zahl heranzuziehen. Beim Vergleich der Sherwood-Zahlen des STN- und des SK-22-Gewebes deckt sich das Ergebnis mit den Erwartungen. Das STN-Gewebe hat eine Sherwood Zahl von 12,8 und das SK-22 Gewebe von 12. Beim Vergleich der Sherwood-Zahlen aller Filtergewebe mit den Reinigungskinetiken, fällt auf, dass die Sherwood-Zahl das Reinigungsverhalten der Gewebe gut widerspiegelt. Je größer die Sherwood-Zahl ist, desto besser ist das Reinigungsergebnis. In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass eine experimentell bestimmte Sherwood-Zahl, die realen Reinigungsvorgänge einer löslichen Verunreinigung auf Filtermedien beschreiben kann. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich nun mit einer Dimensionsanalyse, um die Sherwood-Zahl auch theoretisch vorherzusagen zu können.

6.4 Dimensionsanalyse

Um die Sherwood-Zahl für die Filtermedienreinigung mit kontinuierlicher Strömung vorherzusagen zu können, mussten weitere Kennzahlen erarbeitet werden, die das System beschreiben. Dazu wurde eine Dimensionsanalyse durchgeführt. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Analyse sind im Folgenden beschrieben und dargestellt. Tabelle 6-6 fasst noch einmal die Parameter zusammen, die das Reinigungsergebnis maßgeblich beeinflussen.

Tabelle 6-6: Einflussfaktoren bei der kontinuierlichen Reinigung einer löslichen Verunreinigung

Parameter	Einheit	Einfluss auf die Reinigung
Strömungsgeschwindigkeit in Pore $\frac{v}{\epsilon}$	(m/s)	$\frac{v}{\epsilon} \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow (siehe Abbildung 6-5)
Kinematische Viskosität des Fluids ν_{Fluid}	(m/s ²)	$\nu_{Fluid} \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow
Stoffübergangskoeffizient β	(m/s)	$\beta \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow
Webart l_{Gewebe}	(m)	$l_{Gewebe} \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow (siehe Abschnitt 7.2.5)
Diffusionskoeffizient der Verschmutzung D	(m/s)	$D \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow
Flächenspezifische Gewebedicke $\frac{l_{Dicke}}{A_{Gewebe}}$	(1/m)	$\frac{l_{Dicke}}{A_{Gewebe}} \uparrow \rightarrow$ Reinigungsfähigkeit \uparrow

Insgesamt ergeben sich bei der kontinuierlichen Reinigung sechs Einflussfaktoren und zwei Grundeinheiten (m und s). Nach dem PI-Theorem sind somit mindestens vier dimensionslose Kennzahlen notwendig. Die Sherwood-Zahl (Sh), die schon in Abschnitt 6.3 etwas näher erläutert wurde, die Reynolds-Zahl (Re), die ebenfalls in der Literatur bekannt ist, die Geometrie-Zahl C , die die geometrischen Verhältnisse des Gewebes berücksichtigt, und die Schmidt-Zahl (Sc), die die Stoffeigenschaften der Verschmutzungsart betrachtet, sind von Bedeutung. In den folgenden Gleichungen sind erhaltenen Kennzahlen ausführlich dargestellt:

$$Re = \frac{v \cdot l_{\text{Gewebe}}}{\varepsilon \cdot \nu_{\text{Fluid}}} \quad 6-10$$

Hier bezeichnet v die Strömungsgeschwindigkeit und ε die Porosität des jeweiligen Filtermediums. C wird als Geometriezahl bezeichnet, denn sie beinhaltet die geometrischen Zusammenhänge des jeweiligen Filtergewebes:

$$C = \frac{l_{\text{Dicke}} \cdot l_{\text{Gewebe}}}{A_{\text{Gewebe}}} \quad 6-11$$

Eine weitere wichtige Kennzahl ist die Schmidt-Zahl (Sc). Sie beschreibt die Stoffeigenschaften zwischen Verschmutzungsart und umströmenden Fluid:

$$Sc = \frac{D_{\text{Verschmutzung}}}{\nu_{\text{Fluid}}} \quad 6-12$$

Nun kann die Sherwood-Zahl (Sh) mit den bisher vorgestellten dimensionslosen Kennzahlen dargestellt werden. Die Exponenten ergeben sich aus der unterschiedlichen Gewichtung des Einflusses der verschiedenen Parameter auf das Reinigungsergebnis:

$$Sh = Re \cdot C^{0,2} \cdot Sc^{0,4} \quad 6-13$$

Mit diesem Zusammenhang ist es nun möglich, die Sherwood-Zahl im Vorfeld, unter Kenntnis der Filter-, der Strömungs- und der Verunreinigungseigenschaften das Reinigungsergebnis abzuschätzen. In Abbildung 6-10 sind die experimentell bestimmten Sherwood-Zahlen und die berechneten Sherwood-Zahlen (unter Zuhilfenahme von Gleichung 6-13) dargestellt.

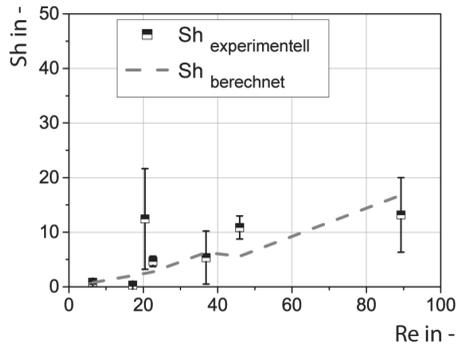


Abbildung 6-10: Vergleich experimentell bestimmter und berechneter Sherwood-Zahlen (genaue Stoffdaten der einzelnen Datenpunkte sind in Tabelle C-1 im Anhang dargestellt)

Es ist ersichtlich, dass die berechneten mit den experimentellen Sherwood-Zahlen recht gut übereinstimmen. Somit ist eine Vorhersage des Reinigungsergebnisses über die Berechnung der Sherwood-Zahl tendenziell möglich. Durch weitere Versuche können die Exponenten der einzelnen Kennzahlen noch weiter optimiert werden, um so eine noch genauere Berechnung zu erreichen.

7 Kontinuierliche und pulsierende Reinigung einer partikulären Verunreinigung

Da in Filtrationsprozessen nicht nur lösliche Verunreinigungen zum Einsatz kommen, sondern partikuläre Verunreinigungen aufgrund ihrer Adhäsion und Unlöslichkeit in Lösungsmitteln vermehrt zu Reinigungsproblemen führen, ist der Reinigung einer partikulären Verunreinigung von Filtermedien ebenfalls ein Kapitel gewidmet. Das Kapitel ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil beschäftigt sich mit der Reinigung mithilfe kontinuierlicher Strömung, bei der die Versuche mit der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Reinigungsanlage erfolgen. Der zweite Teil geht näher auf die Reinigung mithilfe pulsierender Strömung ein, bei der die in Abschnitt 5.2 beschriebene Reinigungsanlage zum Einsatz kommt. Die Motivation für die Untersuchung einer pulsierenden Strömung war die bereits in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Verbesserung der Reinigungsfähigkeit in Rohrleitungen. Diese Methode wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Reinigung von Filtermedien angewendet. Als Verunreinigung wurden fluoreszierende Melaminharzpartikel eingesetzt. Das Beurteilungskriterium war bei beiden Verfahren der Reinigungsgrad. Er beschreibt den Anteil aller vom Filtermedium erfolgreich abgereinigten Partikel. Neben der Untersuchung der Reinigungskinetik sowohl bei der pulsierenden als auch bei der kontinuierlichen Strömung, erfolgen im Rahmen dieses Kapitels auch Untersuchungen zur Strömungsgeschwindigkeit, Filtergeometrie und Partikelgröße der Verunreinigung. Da reinigungsrelevante Parameter bei der pulsierenden Strömung die Pulsdauer und Pulspause sein können, erfolgen hierzu weitere Versuche. Abschließend widmet sich dieses Kapitel wiederum einer Dimensionsanalyse, um das Reinigungsergebnis bei der Reinigung mithilfe pulsierender Strömung theoretisch unter Kenntnis der reinigungsrelevanten Parameter vorhersagen zu können.

7.1 Vorgehensweise bei der Reinigung

Im Folgenden Abschnitt ist die Vorgehensweise bei der Kontaminierung der Gewebe und die Beurteilung der Reinigungsversuche genauer erläutert und dargestellt.

7.1.1 Kontamination der Gewebe

Die Kontaminierung der Gewebe erfolgte in einer Kontaminierungseinheit, die nach dem Prinzip einer Drucknutsche funktioniert. In Abbildung 5-6 ist die Einheit dargestellt. Nach der Kontaminierung erfolgte die Trocknung des Filtermediums bei 70°C im Trockenschrank für 30 min. Fluoreszenzmikroskop-Aufnahmen sind jeweils vor und nach dem Reinigungsprozess notwendig, um die Partikelzahl vor und nach der Reinigung bestimmen zu können. Die Aufnahmen erfolgten nicht für das komplette Filtermedium, sondern für eine reproduzierbare Aussage reichten drei Bilder im Mittelpunkt des Gewebes aus. Für die Untersuchungen zur Homogenität der Reinigung mit pulsierender Strömung (siehe Abschnitt 7.3.5) waren vier Bilder entlang des Filterradius notwendig. Die Größe eines Bildes nimmt jeweils bei 20facher Vergrößerung eine Fläche von 1,8 mm auf 1,3 mm ein. Ziel ist bei der Kontaminierung nicht, einen Kuchen auf dem Filtermedium zu bilden, sondern die Partikel einzeln und homogen auf dem Filtergewebe zu verteilen, wie es dem Zustand nach dem Kuchenabwurf entspricht. In Abbildung 7-1 ist ein Filtermedium nach der Kontamination dargestellt.

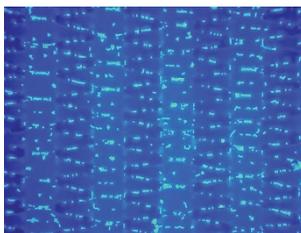


Abbildung 7-1: kontaminiertes Filtermedium

Das Filtermedium selbst fluoresziert aufgrund von Bleichstoffen, die in dem Kunststoff enthalten sind, ebenfalls im UV-Bereich. Jedoch leuchten die fluoreszierenden Partikel im UV-Bereich intensiver als das Gewebe, was die spätere Bildbearbeitung und –Auswertung erleichtert. In der gezeigten Abbildung sind die hellblauen Punkte die Fluoreszenzpartikel.

7.1.2 Experimentelle Bestimmung des Reinigungsgrades

Der mittlere Reinigungsgrad (G) beschreibt den Anteil der erfolgreich abgereinigten Partikel. Er setzt sich aus der Differenz zwischen 1 und dem mittleren Rückstand (R_m) an Partikeln auf dem Filtermedium zusammen. Für $i = (1 \dots m)$ Einzelmessungen ergibt sich für den mittleren Reinigungsgrad (G) dann (Gleichung 7-1):

$$G = 1 - R_m = 1 - \frac{1}{m} \cdot \sum_{l=1}^m \frac{N_{t, \text{Partikel}, l}}{N_{0, \text{Partikel}, l}} \quad 7-1$$

Der Rückstand (R_m) ist das Verhältnis aus der zurückgebliebenen Partikelanzahl zum Reinigungszeitpunkt t ($N_{t, \text{Partikel}, i}$) und der Partikelanzahl vor der Reinigung ($N_{0, \text{Partikel}, i}$). Es erfolgten Aufnahmen des Gewebes nach der Kontamination und Reinigung. Die Anzahl der Partikel wurde mit der Software ImageJ bestimmt

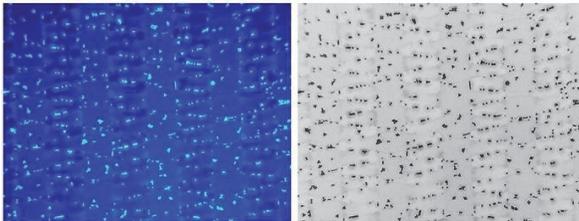


Abbildung 7-2: Bearbeitung in Photoshop, links: Originalbild, rechts: Bild nach der Bearbeitung in Photoshop®

Zur Durchführung der Auszählung in ImageJ war es jedoch notwendig, ein Binärbild vorliegen zu haben. Deshalb wurde das Originalbild vorab in Photoshop® bearbeitet. Hierbei erfolgten Anpassungen der Helligkeit, des Kontrasts und des Tonwerts, um die Partikel deutlich vom Hintergrund abzuheben. Danach wurde das Bild in ein Schwarz-Weiß-Bild konvertiert. In Abbildung 7-2 ist die Bearbeitung mit Photoshop® dargestellt. Durch Einstellen eines geeigneten Schwellenwertes in ImageJ, konnte die Gesamtpixelfläche der Partikel ausgegeben werden. Die Gesamtpixelfläche kam zum Einsatz, da, wie in der Abbildung ersichtlich ist, die Partikel nicht alle als Einzelpartikel zu erkennen sind, sondern auch als Agglomerate vorkommen. Durch Kenntnis der mittleren Pixelfläche eines Partikels, das im Vorfeld bildanalytisch bestimmt wurde, konnte auf die Partikelanzahl geschlossen werden.

7.2 Reinigung mithilfe kontinuierlicher Strömung

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der kontinuierlichen Reinigung der partikulären Verunreinigungen von Filtermedien dargestellt. Die Versuche erfolgten an der kontinuierlichen Durchströmungsanlage (siehe Abschnitt 5.1) und mit den in Abschnitt 4.2 vorgestellten fluoreszierenden Melaminharzpartikel. Die Auszählung der Partikel und die Bestimmung des Reinigungsgrades ist in Abschnitt 7.1 beschrieben. Bestandteil der Untersuchungen waren die Reinigungskinetik, der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit, der Temperatur des Reinigungsfluides, der Partikelgröße und der unterschiedlichen Arten von Filtermedien.

7.2.1 Reinigungskinetik

In Abbildung 7-3 ist die Reinigungskinetik der Filtermedien PET-22, PEEK-12 und PET-12 dargestellt. Aufgetragen ist der mittlere Reinigungsgrad (G) über der Prozesszeit (t). Beide Filtermedien wurden mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,06 m/s durchströmt.

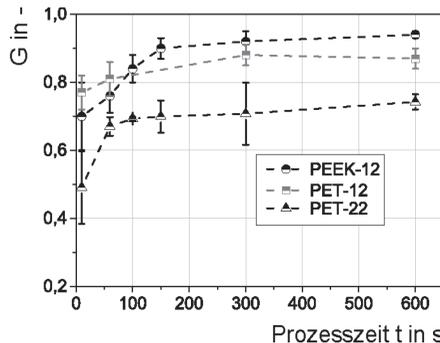


Abbildung 7-3: Reinigungskinetik der kontinuierlichen Filterreinigung, $v = 0,06$ m/s, Verunreinigung: Melaminharzpartikel 10 μm

Bei allen drei Filtermedien ist in den ersten 150 s der Reinigung eine enorme Zeitabhängigkeit erkennbar. Bei PET-22 ist eine Erhöhung des mittleren Reinigungsgrades um 18% festzustellen, bei PEEK-12 steigert sich der Reinigungsgrad in den ersten 150 s um 14% und beim PET-12 ist in den ersten 300 s eine Vergrößerung um 11% bemerkbar. Da es sich bei der Verunreinigung um monodisperse, in Wasser unlösliche Partikel handelt, überrascht dieses Verhalten zunächst. Beim genaueren Betrachten der Gewebegeometrie, lässt sich dieser Sachverhalt durch unterschiedlich wirkende Strömungskräfte während der Rei-

nigung, abhängig von der Position der Partikel auf den Fasern, erklären (siehe dazu auch [2, 66]). Auf diesen Sachverhalt wird in Abschnitt 8 näher eingegangen. Aus dem Diagramm geht weiterhin hervor, dass für die kontinuierliche Reinigung für die untersuchten Geschwindigkeiten ein Reinigungsgrad von 0,92 erreichbar ist.

Beim Vergleich der Reinigungsgrade der drei Filtermedien fällt auf, dass das PEEK-12 das beste und das PET-22 das schlechteste Reinigungsergebnis aufweist. Es ist jedoch anzumerken, dass das PEEK-12-Gewebe eine Porosität von 0,41 hat, während das PET-22- und das PET-12-Gewebe Porositätswerte von 0,61 besitzen. Es herrschen somit unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in den Poren. In Abschnitt 7.2.5 wird die Reinigungsfähigkeit der drei Filtermedien bei konstanter Porengeschwindigkeit verglichen.

7.2.2 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

In Abbildung 7-4 ist der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Reinigungsergebnis dargestellt. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad (G) über der Prozesszeit (t).

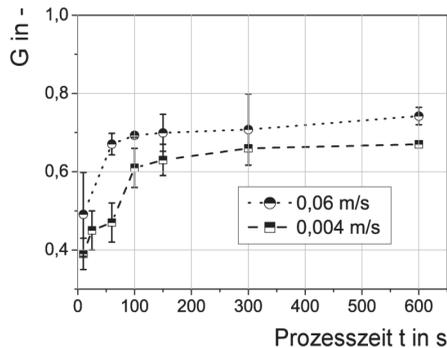


Abbildung 7-4: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit bei der kontinuierlichen Reinigung, Filtermedium: PET-22, Verunreinigung: Melaminharzpartikel 10 μm

Die Versuche erfolgten mit dem Filtermedium PET-22, den 10 μm Partikeln und Strömungsgeschwindigkeiten von 0,004 m/s und 0,06 m/s. Wie zu erwarten war, haben größere Strömungsgeschwindigkeiten auch einen höheren Reinigungsgrad (G) zur Folge. Nach einer Prozesszeit (t) von 600 s ist bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,06 m/s ein um 7 % höherer Reinigungsgrad (G) erzielbar. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wirken höhere Kräfte auf

die Partikel und somit ist auch ein besseres Reinigungsergebnis zu erwarten. Es ist ersichtlich, dass der endgültige Reinigungsgrad bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,06 m/s schon nach 100 s erreicht ist, da er ab diesem Zeitpunkt konstant bleibt. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,004 m/s ist der Endzustand jedoch erst nach 300 s erreicht. Somit geht eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit mit einer Erhöhung des Reinigungsgrades und einer Zeitersparnis einher.

7.2.3 Einfluss der Temperatur

Da bei vielen Reinigungsprozessen auch die Temperatur zur Verbesserung der Reinigung erhöht wird und dies bei löslichen Verunreinigungen aufgrund der bekannten Stoffübergangsgesetze auch sinnvoll ist, soll nun in diesem Abschnitt der Temperatureinfluss des Reinigungsfluids bei der Reinigung von partikulären Verunreinigungen geklärt werden. Als Filtermedium kam bei diesen Untersuchungen das PEEK-12 aufgrund seiner guten Hitzebeständigkeit zum Einsatz. Dabei wurde das Reinigungsfluid (in unserem Fall VE-Wasser) in den Vorlagebehältern auf die gewünschten Temperaturen eingestellt. Das Reinigungsfluid wurde für die jeweilige Versuchsreihe auf 20°C, 50°C und 80°C erwärmt. Jede Messung wurde mindestens dreimal wiederholt. In Abbildung 7-5 sind die Ergebnisse dargestellt.

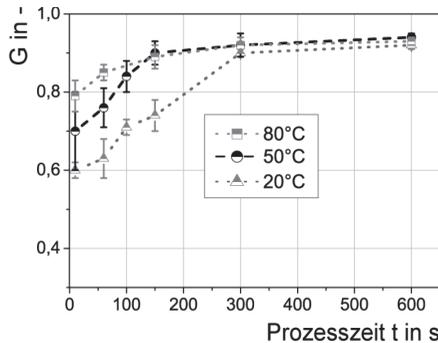


Abbildung 7-5: Einfluss der Temperatur auf die Reinigung von Filtermedien, Filtermedium: PEEK-12, Verunreinigung: Melaminharzpartikel 10 μ m, $v = 0,06$ m/s

Aufgetragen ist der Reinigungsgrad (G) über der Prozesszeit (t). Aus der Messreihe ist ein Temperatureinfluss ersichtlich. Jedoch beeinflusst die Temperatur nur die Kinetik der Reinigung und nicht den Reinigungserfolg. Das bedeutet, je

höher die Temperatur des Reinigungsfluides ist, desto schneller findet die Ablösung der Partikel von der Filteroberfläche statt. Das Endergebnis ist jedoch bei allen drei Temperaturen des Reinigungsfluides konstant. Durch eine Temperaturerhöhung des Reinigungsfluides ist es somit möglich, den Reinigungsverlauf zu beschleunigen. Dabei muss jedoch abgewogen werden, welcher Faktor (Reinigungszeit oder Temperatur des Reinigungsfluides) für den Gesamtprozess am Rentabelsten ist.

Zur Erklärung der Temperaturabhängigkeit ist in Tabelle 7-1 zu den verschiedenen Temperaturen die jeweilige Reynolds-Zahl aufgetragen.

Tabelle 7-1: Eigenschaften der Strömung bei den verschiedenen Temperaturen

Geschwindigkeit in m/s	Temperatur in °C	Dichte Reinigungsfluid in kg/m ³	Dynamische Viskosität in 10 ⁻³ ·N·s/m ²	Rohr-Reynolds-Zahl Re_{Rohr} in -
0,061	20	998,2	1,002	1570
0,061	50	988,03	0,547	2850
0,061	80	971,79	0,354	4360

Die dargestellte Reynolds-Zahl ist dabei auf die Geschwindigkeit im Rohrquerschnitt bezogen. Es ist ersichtlich, dass die Reynolds-Zahl mit steigender Temperatur zunimmt, was an der abnehmenden Viskosität des Strömungsfluides liegt. Ab 50°C nehmen die Reynolds-Zahlen Werte größer 2300 an. Bei 80°C steigt die Reynolds-Zahl auf 4360. Die Erhöhung der Reynolds-Zahl ist auch der Grund für die schnellere Reinigungskinetik bei 50°C und 80°C im Vergleich bei 20°C. Um diese Vermutung zu bestätigen, wurde die Reynolds-Zahl bei 20°C über die Strömungsgeschwindigkeit so angepasst, dass die Reynolds-Zahlen bei 20°C und 80°C annähernd gleiche Werte annahmen. Dies war für eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,17 m/s bei 20°C der Fall. Somit ergab sich für $Re_{20^\circ\text{C}} = 4230$ und für $Re_{80^\circ\text{C}} = 4360$.

In Abbildung 7-6 sind die Reinigungskinetiken für die erwähnten Reynolds-Zahlen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kinetiken sich sehr stark gleichen. Die geringe Abweichung zwischen den beiden Kurven ist mit der kleinen Differenz der beiden Reynolds-Zahlen zu begründen. Es war jedoch aufgrund von Messungenauigkeiten nicht möglich, die exakt gleichen Reynolds-Zahlen einzustellen. Somit ist klar, dass der entscheidende Faktor für die Reinigungskinetik die Größe der Reynolds-Zahl ist.

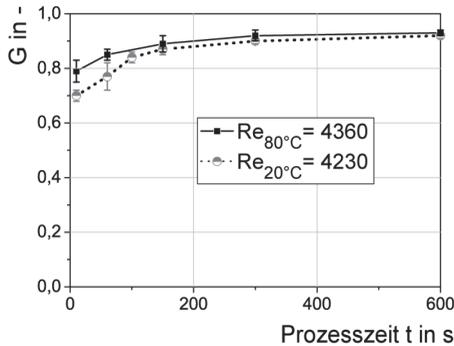


Abbildung 7-6: Reinigungskinetik bei 20°C und 80°C mit angepasster Reynolds-Zahl

Eine weitere Ursache für den Temperatureinfluss kann außerdem die Temperaturabhängigkeit der Brownschen Bewegung, der an der Van-der-Waals-Bindung beteiligten Atome, sein.

7.2.4 Einfluss der Partikelgröße

Um den Einfluss des Partikeldurchmessers der Verunreinigung zu untersuchen, wurden die zu reinigenden Filtermedien mit 5 bzw. 10 μm großen Melaminharzpartikeln beladen und in der kontinuierlichen Reinigungsanlage bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,06 m/s gereinigt. In Abbildung 7-7 sind die Ergebnisse dargestellt.

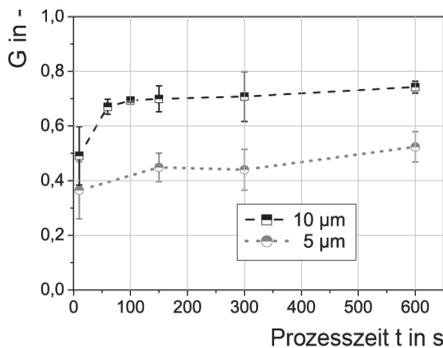


Abbildung 7-7: Einfluss der Partikelgröße auf die Reinigung, Filtermedium PET-22 Anströmgeschwindigkeit $v = 0,06$ m/s

Jede Messung wurde mindestens dreimal wiederholt. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad über der Prozesszeit (t) für Partikelgrößen von 5 und 10 μm . Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass grobe Verunreinigungen leichter zu reinigen sind als feine. Nach einer Prozesszeit von 600 s ist im Reinigungsgrad noch ein Unterschied von 32 % zu erkennen. Der Grund für diesen Sachverhalt ist, dass die Adhäsionskräfte (Van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Kräfte) proportional zum Partikeldurchmesser ansteigen, während die trennenden Kräfte (Auftriebskräfte, Widerstandskräfte und Moment der Oberflächenspannung), proportional zum Partikeldurchmesser im Quadrat ansteigen, wie das Modell nach Burdick [65] zeigt.

7.2.5 Einfluss des Filtermediums

Wie bereits bei der Darstellung der Reinigungskinetik in Abbildung 7-3 erläutert wurde, weisen die Filtermedien PET-22, PEEK-12 und PET-12 eine unterschiedliche Reinigungsfähigkeit auf. Da jedoch in der genannten Abbildung unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in den Poren vorlagen, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der Reinigungsfähigkeit der drei Filtermedien bei konstanter Porengeschwindigkeit. Dazu war es zunächst notwendig, die jeweilige Anströmgeschwindigkeit zu berechnen, bei der die gleiche Geschwindigkeit in den Poren auftritt. Allgemein lässt sich die Porengeschwindigkeit (v_{Pore}) mit Gleichung 7-2 berechnen:

$$v_{\text{Pore}} = \frac{v}{\varepsilon}. \quad 7-2$$

Nach Einsetzen der jeweiligen Porosität (ε) ergeben sich für die drei Filtermedien folgende Porengeschwindigkeiten v_{Pore} (in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit v):

$$v_{\text{Pore,PET-22}} = v_{\text{Pore,PET-12}} = 1,64 \cdot v, \quad 7-3$$

$$v_{\text{Pore,PEEK-12}} = 2,41 \cdot v. \quad 7-4$$

Mithilfe dieser Zusammenhänge konnte die für das jeweilige Filtermedium benötigte Anströmgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Porengeschwindigkeit lag bei den durchgeführten Versuchen bei $v_{\text{Pore}} = 0,15 \text{ m/s}$, was für das PEEK-12 Gewebe einer Anströmgeschwindigkeit (v) von 0,066 m/s und für das PET-12 und PET-22 einer Anströmgeschwindigkeit von 0,1 m/s entsprach. In Abbildung 7-8 sind die Ergebnisse dargestellt.

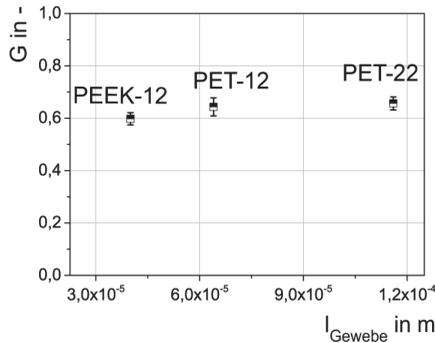


Abbildung 7-8: Vergleich der drei Filtermedien PEEK-12, PET-12, PET-22,
 $v_{\text{Pore}} = \text{const.} = 0,3 \text{ m/s}$, $t_{\text{Prozess}} = 23 \text{ s}$

Aufgetragen ist der mittlere Reinigungsgrad (G) über der charakteristischen Länge (l_{Gewebe}). Die charakteristische Länge wurde bereits in Abschnitt 6.3 eingeführt (siehe Gleichung 6-4) und beschreibt die Anzahl der Umschlingungen pro Fläche. In dem genannten Abschnitt wurde gezeigt, dass sie für die Reinigung einer löslichen Verunreinigung eine große Rolle spielt. Filtermedien mit großer charakteristischer Länge ließen sich leichter reinigen als Filtermedien mit kleinerer charakteristischer Länge. Es ist nun zu prüfen, ob diese Aussage auch für eine partikuläre Verunreinigung zutrifft. Bei Betrachtung der charakteristischen Längen der einzelnen Gewebe ist erkennbar, dass mit steigender charakteristischer Länge l_{Gewebe} der Reinigungsgrad leicht zunimmt (vor allem beim Vergleich des Reinigungsgrades von PEEK-12 und PET-22). Je mehr Umschlingungen ein Gewebe pro Fläche besitzt, desto schlechter ist also seine Reinigungsfähigkeit. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering, da die charakteristischen Längen der Gewebe recht nahe beieinander liegen.

7.2.6 Dimensionsanalyse

Um das Reinigungsverhalten von Filtermedien vorhersagen zu können und das richtige Gewebe in Bezug auf die Reinigungsfähigkeit auszuwählen, sind dimensionslose Kennzahlen notwendig, die die Einflussfaktoren der Reinigung beinhalten. Deshalb erfolgte eine Dimensionsanalyse [97, 109]. Um die Methode durchführen zu können, ist die Kenntnis der Einflussparameter notwendig. In Tabelle 7-2 sind alle Parameter aufgelistet, die für die Reinigung mit kontinuierlicher Strömung relevant sind.

Tabelle 7-2: Parameter für die Dimensionsanalyse

Parameter	Einheit	Einfluss auf den Reinigungsgrad G
Prozessdauer t_{Prozess}	(s)	$t_{\text{Prozess}} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Prozessdauer, ab der G konstant ist t_{konst}	(s)	-
Kinematische Viskosität des Fluids ν_{Fluid}	(m ² /s)	$\nu_{\text{Fluid}} \uparrow \rightarrow G \downarrow$
Strömungsgeschwindigkeit in der Pore $\frac{v}{\epsilon}$	(m/s)	$\frac{v}{\epsilon} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Gewebedicke l_{Dicke}	(1/m)	$l_{\text{Dicke}} \uparrow \rightarrow G \downarrow$
Mantelfläche des Gewebes A_{Gewebe}	(m ²)	-
Webart l_{Gewebe}	(m)	$l_{\text{Gewebe}} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Partikeldurchmesser d_p	(m)	$d_p \uparrow \rightarrow G \downarrow$
Anteil abgelöster Partikel: $1 - \frac{N_{t,\text{Partikel}}}{N_{0,\text{Partikel}}}$	1	-

Dabei ergeben sich acht dimensionsbehaftete Parameter und zwei Grundeinheiten, die das System beeinflussen. Gemäß dem PI-Theorem [97] lassen sich somit sechs dimensionslose Kennzahlen bilden. Das weitere Vorgehen zeigte jedoch, dass für den empirischen Ansatz zur Bestimmung des Reinigungsgrades davon nur vier Kennzahlen ausschlaggebend sind. Deshalb wird im Folgenden auch nur auf die relevanten Kennzahlen eingegangen.

Der Reinigungsgrad G lässt sich experimentell wie folgt bestimmen:

$$G = 1 - \frac{N_{t,Partikel}}{N_{0,Partikel}} \quad 7-5$$

Hierbei ist $N_{t,Partikel}$ die Anzahl der Partikel, die nach der Reinigung auf dem Gewebe zurückgeblieben sind und $N_{0,Partikel}$ die Anzahl der Partikel die sich vor der Reinigung auf dem Gewebe befanden.

$$Re = \frac{v \cdot l_{Gewebe}}{\varepsilon \cdot \nu_{Fluid}} \quad 7-6$$

Re ist die Reynolds-Zahl, die die Eigenschaften der Strömung beschreibt. Als charakteristische Länge wird hier die Webart l_{Gewebe} eingesetzt. Mit ε ist die Porosität der Filtermedien gemeint und $\nu_{Flüssigkeit}$ ist die kinematische Viskosität der Reinigungsflüssigkeit. Die zweite dimensionslose Kennzahl ist N_{kin} . Sie beschreibt den Einfluss der Zeit auf den Reinigungsprozess:

$$N_{kin} = \frac{t_{Prozess}}{t_{konst.}} \quad \text{gilt für } t_{Prozess} < t_{konst.} \quad 7-7$$

$t_{Prozess}$ ist die jeweilige Prozesszeit und $t_{konst.}$ beschreibt den Zeitpunkt, ab dem der Reinigungsgrad einen konstanten Wert annimmt. $t_{konst.}$ wird für die kontinuierliche Reinigung auf 300 s gesetzt. Die Kennzahl N_{kin} nimmt somit Werte kleiner 1 an. Für Prozesszeiten größer oder gleich 300 s wird N_{kin} auf 1 gesetzt.

C dagegen beschreibt den Einfluss auf das Reinigungsergebnis, der durch die geometrischen Abmessungen des ε Gewebes hervorgerufen wird.

$$C = \frac{l_{Gewebe} \cdot l_{Dicke}}{A_{Gewebe}} \quad 7-8$$

Hierbei ist A_{Gewebe} die komplette Mantelfläche des untersuchten Filtergewebes, das mithilfe der geometrischen Abmessungen berechnet wurde (siehe Anhang C.1). Ein Einfluss, der bisher noch keine Berücksichtigung fand, ist die Partikelgröße. Das Verhältnis zwischen Partikeldurchmesser d_p und Mantelfläche des Filtergewebes A_{Gewebe} wird durch die dimensionslose Kennzahl V_p beschrieben:

$$V_p = \frac{d_p^2}{A_{Gewebe}} \quad 7-9$$

Die vier bereits aufgeführten Kennzahlen lassen sich zu einer neuen Zahl W_{konti} zusammenfassen. Dabei ergeben sich die dargestellten Potenzen unter Zuhilfenahme der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln.

$$W_{konti} = 10^{10} \cdot Re^{0,6} \cdot N_{kin}^{-1} \cdot C^{0,1} \cdot V_p^2 \quad 7-10$$

In Abbildung 7-9 sind die experimentellen Reinigungsgrade über den berechneten W_{konti} -Zahlen dargestellt.

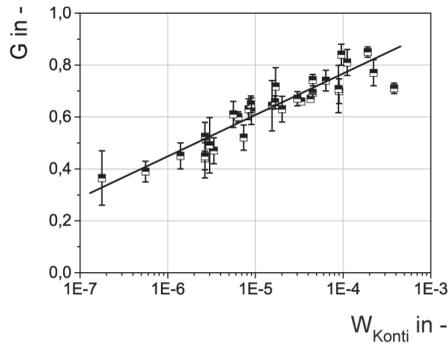


Abbildung 7-9: Reinigungsgrad G über berechneter W_{konti} -Zahl

Bei der einfach-logarithmischen Darstellung ist ein linearer Zusammenhang zwischen G und W_{konti} erkennbar. Somit kann der Reinigungsgrad G mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$G = 0,0677 \cdot \ln(W_{konti}) + 1,38 \quad 7-11$$

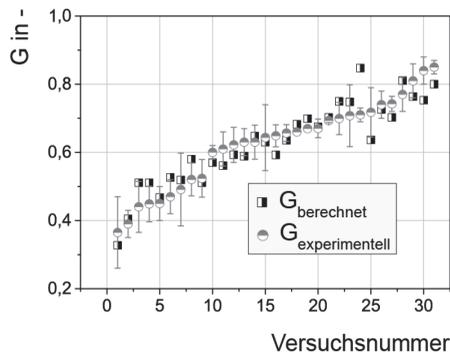


Abbildung 7-10: $G_{berechnet}$ und $G_{experimentell}$ für alle Versuche aus Abschnitt 7.2

Abbildung 7-10 vergleicht nun die experimentellen mit den berechneten Reinigungsgraden aller in Abschnitt 7.2 durchgeführten Versuche. Es wird deutlich, dass die experimentellen mit den berechneten Daten sehr gut übereinstimmen. Mit der W_{Konti} -Zahl ist es nun möglich, unter Kenntnis der Geometrieparameter des Gewebes, der Strömungsparameter und der Partikelgröße, den Reinigungsgrad zu berechnen.

7.2.7 Flächenspezifischer Reinigungsfluidverbrauch

Um den Verbrauch an Reinigungsfluid (VE-Wasser) beurteilen zu können, wurde der flächenspezifische Reinigungsfluidverbrauch ($V_{A,\text{spez}}$), der dem benötigten Volumen an Reinigungsfluid bezogen auf die gereinigte Fläche entspricht, betrachtet. In Abbildung 7-11 sind die Ergebnisse bei zwei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten (0,004 m/s und 0,06 m/s) dargestellt.

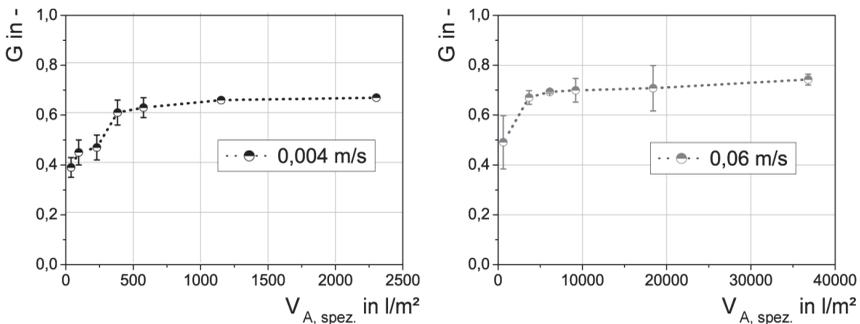


Abbildung 7-11: Flächenspezifischer Reinigungsfluidverbrauch $V_{A,\text{spez}}$. Am Beispiel des Filtermediums PET-.22, Verunreinigung: Melaminharzpartikel 10 μm

Der flächenspezifische Reinigungsfluidverbrauch ($V_{A,\text{spez}}$) ist bei beiden Anströmgeschwindigkeiten relativ groß. Er nimmt bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,004 m/s einen Wert von 1200 l/m^2 für einen nicht zufriedenstellenden Reinigungsgrad von 67 % an. Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,06 m/s wird zwar ein Reinigungsgrad von 74 % erreicht, dafür liegt der flächenspezifische Reinigungsfluidverbrauch bei 37 000 l/m^2 also 31 mal höher als bei einer Geschwindigkeit von 0,004 m/s. Um diese Mengen an Reinigungsfluid zu reduzieren und einen höheren Reinigungsgrad zu erzielen, ist es notwendig ein alternatives Reinigungsverfahren zu finden. Deshalb wird im nächsten Abschnitt die Reinigungswirkung einer pulsierenden Strömung untersucht.

7.3 Reinigung mithilfe einer pulsierenden Strömung

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse aus den Versuchen der Reinigung mit pulsierender Strömung dargestellt. Die Versuche erfolgten an der Puls-Anlage (siehe Abschnitt 5.2). Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine Kennzahl zu entwickeln, die den Reinigungsprozess beschreibt und das Reinigungsergebnis voraussagen kann. Dazu war es jedoch notwendig, im Vorfeld zu wissen, von welchen Faktoren der Reinigungsprozess abhängig ist. Deshalb ist in diesem Abschnitt eine Parametervariation dargestellt, um die Einflussfaktoren besser zu verstehen. Die Untersuchungen umfassten die Pulsgeschwindigkeit, die Pulsdauer, die Pulspause, die Prozesszeit und den Abstand zwischen Düse und Filtermedium. Zusätzlich wurde die Fragestellung geklärt, wie homogen die Reinigung verläuft. Unter Homogenität wird der Verlauf des Reinigungsgrades entlang der Filterfläche verstanden.

7.3.1 Charakterisierung der pulsierenden Strömung

In Abbildung 7-12 ist die charakteristische Pulsströmungsgeschwindigkeit exemplarisch über der Prozesszeit dargestellt. Dabei wird ein Profil mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit (v_{Puls}) über ein definiertes Zeitintervall aufgegeben. Zwischen zwei Pulsen ist eine definierte Pausenzeit t_{Pause} .

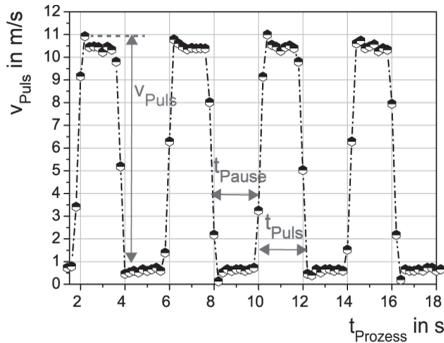


Abbildung 7-12: Charakteristische Pulsströmungsgeschwindigkeit der pulsierenden Strömung

Die Frequenz eines Pulses (f_{Puls}) kann mithilfe der Pulsdauer (t_{Puls}) und der Pausenzeit (t_{Pause}) berechnet werden (Gleichung 7-12):

$$f_{\text{Puls}} = \frac{1}{t_{\text{Puls}} + t_{\text{Pause}}} \cdot \quad 7-12$$

Im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgt die Versuchsbeschreibung jedoch mithilfe der Pulsdauer und der Pulspause und nicht mit der Frequenz.

7.3.2 Einfluss der Pulsströmungsgeschwindigkeit und Zeit

In Abbildung 7-13 ist der Einfluss der Prozesszeit und der Pulsströmungsgeschwindigkeit dargestellt. Aufgetragen ist der mittlere Reinigungsgrad G über der Prozesszeit (links) bzw. über dem Reinigungsflüssigkeitsverbrauch (rechts). Die Reinigungsversuche erfolgten für das Filtermedium PET-22 bei drei verschiedenen Pulsströmungsgeschwindigkeiten, für eine Pulsdauer von $t_{\text{Puls}} = 0,5$ s und einer Pulspause von $t_{\text{Pause}} = 0,5$ s.

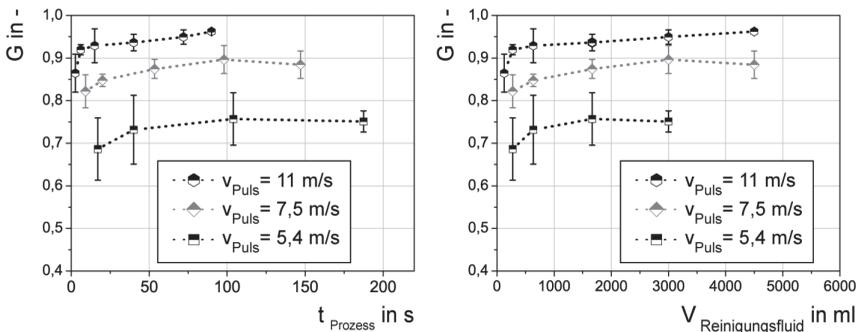


Abbildung 7-13: Einfluss der Prozesszeit (links) und der Pulsströmungsgeschwindigkeit (rechts) auf die Reinigung: $t_{\text{Puls}} = 0,5$ s, $t_{\text{Pause}} = 0,5$ s

Aus dem linken Diagramm wird deutlich, dass mit zunehmender Prozesszeit der Reinigungsgrad ansteigt. Im ersten Abschnitt des Reinigungsgrad-Verlaufes (zwischen 0 und 100 s) steigt die Kurve bei allen drei Filtermedien langsam an. Nach 100 s jedoch ist bei allen drei untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten der Maximalwert des Reinigungsgrades erreicht. Ab diesem Zeitpunkt bleibt der Reinigungsgrad konstant. Die Kraft aus der Strömung reicht hier nicht mehr aus, um die Haftkraft der Partikel zu überwinden. Es ist weiterhin erkennbar, dass der Zeiteinfluss mit steigender Strömungsgeschwindigkeit nicht mehr so stark ausgeprägt ist ($v_{\text{Puls}} > 7,5$ m/s). Die Zeitabhängigkeit bei der Reinigung kann mit dem Haftverhalten der Partikel an der Faser erklärt werden. Die Partikel sind nach der Kontamination zufällig auf den Fasern verteilt, das bedeutet einige

Partikel sind zwischen den Maschen, also innerhalb der Umschlingungen des Gewebes, lokalisiert. Andere Partikel befinden sich dagegen an verschiedenen Stellen auf der Faser. Je nach Position kann es nun passieren, dass sich Partikel, bevor sie abgelöst werden, erst einmal eine gewisse Distanz entlang der Faseroberfläche bewegen oder aber ohne Bewegung direkt abgelöst werden. Die Art des Ablösemechanismus ist in Abschnitt 8 erklärt.

Um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Abreinigungsverhalten genauer zu untersuchen, wurden die experimentellen Daten aus Abbildung 7-13 (links) über den Reinigungsflüssigkeitsverbrauch dargestellt (Abbildung 7-13 rechts). Es ist ersichtlich, dass mit steigender Pulsströmungsgeschwindigkeit der Reinigungsgrad ansteigt. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist, desto höher sind die Wandschubspannungen, die auf ein Partikel wirken und desto eher wird die Haftkraft des Partikels durch die Strömungskraft überwunden.

7.3.3 Einfluss der Pulsdauer und Pulspause

Abbildung 7-14 stellt den Einfluss der Pulsdauer t_{Puls} und den Einfluss der Pulspause t_{Pause} dar.

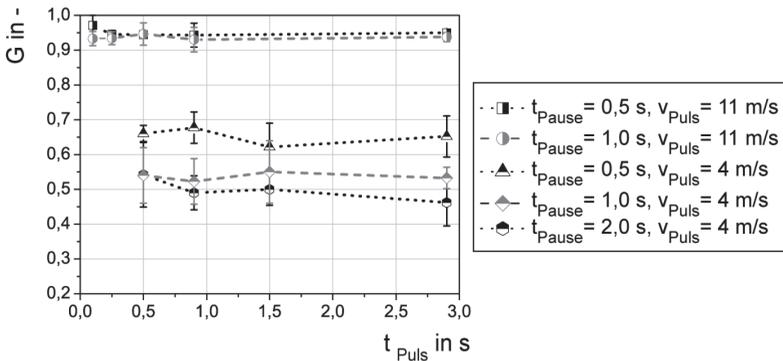


Abbildung 7-14: Einfluss der Pulsdauer und Pulspause auf das Reinigungsverhalten von Filtermedien, Abstand zwischen Filter und Düse: 17 mm, PET-22, kontaminiert mit 10 μm Partikeln

Die Experimente erfolgten bei zwei verschiedenen Pulsströmungsgeschwindigkeiten ($v_{Puls} = 4 \text{ m/s}$; 11 m/s), bei fünf verschiedenen Pulsdauern ($t_{Puls} = 0,25 \text{ s}$; $0,5 \text{ s}$; $0,9 \text{ s}$; $1,5 \text{ s}$; $2,9 \text{ s}$) und bei einem konstanten Reinigungsmittelverbrauch von 274 ml. Zur vereinfachten Darstellung werden im Folgenden nur die Ergebnisse für das Filtermedium PET-22 gezeigt, da die beiden anderen Filtermedien (PET-12 und PEEK-12) die gleichen Tendenzen aufwiesen. In Abbildung 7-14

ist der Verlauf des Reinigungsgrades über der Pulsdauer bei unterschiedlichen Pulsphasen dargestellt. Bei Betrachtung der Verläufe aller Pulsströmungsgeschwindigkeiten ($v_{Puls} = 11 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$) fällt auf, dass der Reinigungsgrad unabhängig von der Pulsdauer ist. Des Weiteren ist für die Reinigungsgradverläufe bei einer Pulsströmungsgeschwindigkeit von $v_{Puls} = 4 \text{ m/s}$ und variierenden Pulsphasen zu sehen, dass die Pulsphase einen großen Einfluss auf den Reinigungsgrad hat. Mit sinkender Pulsphase steigt der Reinigungsgrad (vergleiche Reinigungsgrade bei $t_{Pause} = 0,5 \text{ s}$ und $t_{Pause} = 2 \text{ s}$). Je schneller die Pulse aufeinander folgen, desto besser ist das Reinigungsergebnis. Dieses Phänomen konnte jedoch bei Pulsströmungsgeschwindigkeiten von $v_{Puls} = 11 \text{ m/s}$ nicht festgestellt werden. Bei dieser Geschwindigkeit ist kein Einfluss der Pulsphase ($t_{Pause} = 0,5 \text{ s}; 1 \text{ s}$) zu beobachten. Der Grund hierfür ist in den Standardabweichungen zu finden. Bei diesen hohen Geschwindigkeiten erreicht das untersuchte Gewebe einen Reinigungsgrad von ca. 95 %. Eine weitere Erhöhung des Reinigungsgrades durch Verringern der Pulsphase kann im Rahmen der Messgenauigkeit in diesem Bereich nicht dargestellt werden (Standardabweichungen liegen zwischen 2 und 5%). Für einen optimalen Reinigungsprozess ist es demnach von Vorteil, Pulsdauer und Pulsphase so gering wie möglich zu halten, um einen hohen Reinigungsgrad zu erreichen, den Reinigungsflüssigkeitsverbrauch und die gesamte Prozesszeit zu minimieren.

7.3.4 Vergleich der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung

Um die Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung zu vergleichen, erfolgten Versuche bei drei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten ($v = 4 \text{ m/s}$; $7,5 \text{ m/s}$; $15,4 \text{ m/s}$). Bei diesen Versuchsreihen wurde auch die kontinuierliche Strömung über das Magnetventil gesteuert, das für diesen Fall die komplette Prozesszeit offen blieb. Die Flüssigkeit strömt somit auch bei der kontinuierlichen Strömung über die Düse das Filtermedium. Die Versuche für die pulsierende Strömung erfolgten bei einer Pulsdauer von $t_{\text{Puls}} = 0,5 \text{ s}$ und eine Pulspause von $t_{\text{Pause}} = 0,5 \text{ s}$. Das Volumen an Reinigungsflüssigkeit, das durch die Anlage strömte, wurde zwischen 0 und 5000 ml variiert. In Abbildung 7-15 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs dargestellt.

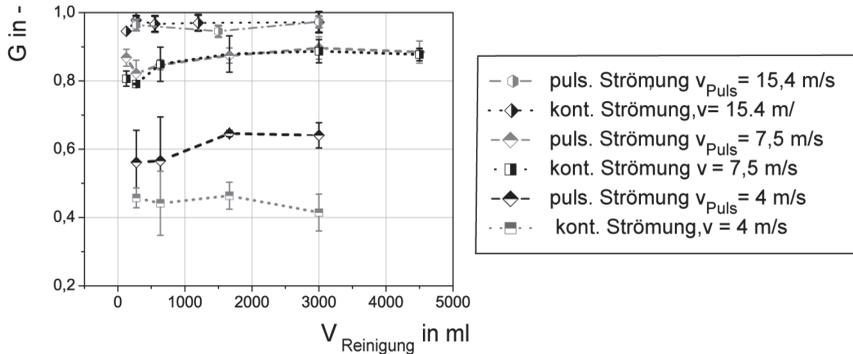


Abbildung 7-15: Vergleich der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung durch die Düse, $t_{\text{Puls}} = 0,5 \text{ s}$; $t_{\text{Pause}} = 0,5 \text{ s}$, Abstand Filtermedium-Düse: 17 mm, PET-22 kontaminiert mit $10 \mu\text{m}$ Partikel

Es ist ersichtlich, dass bei Strömungsgeschwindigkeiten von $15,4 \text{ m/s}$ und $7,5 \text{ m/s}$ keine Unterschiede im Reinigungsgrad zwischen kontinuierlicher und pulsierender Strömung zu erkennen sind. Die jeweiligen Kurven liegen fast übereinander. Für eine Geschwindigkeit von 4 m/s ist jedoch für die pulsierende Strömung ein um 18 % höherer Reinigungsgrad festzustellen. Der Grund, warum dieser positive Effekt der pulsierenden Strömung bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $7,5 \text{ m/s}$ und $15,4 \text{ m/s}$ nicht beobachtbar ist, liegt an der zu geringen Messgenauigkeit. Für die hohen Strömungsgeschwindigkeiten konnten bei der kontinuierlichen Strömung Reinigungsgrade bereits zwischen 90 und 98 % erreicht werden. Eine weitere Erhöhung des Reinigungsgrades ist bei Standardabweichungen im Bereich von 2,5 bis 5 % nicht nachweisbar. Deshalb

wurde der Vergleich ebenfalls für Partikel mit einer Partikelgröße von $5\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Pulspause und Pulsdauer lag jeweils bei $0,5\ \text{s}$ und die Pulsströmungsgeschwindigkeit für die kontinuierliche und pulsierende Strömung jeweils bei $15,4\ \text{m/s}$. In Abbildung 7-16 sind die Ergebnisse dargestellt.

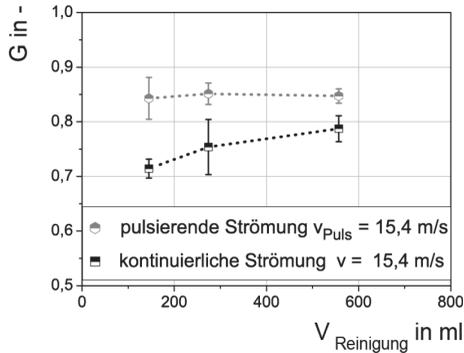


Abbildung 7-16: Vergleich der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung, Abstand Filtermedium-Düse: 17 mm, PET-22 kontaminiert mit $5\ \mu\text{m}$ Partikeln

Die $5\ \mu\text{m}$ Partikel sind im Vergleich zu den $10\ \mu\text{m}$ Partikeln schwerer abzureinigen, weshalb der Reinigungsgrad für die kleineren Partikel auch geringer ist und somit Unterschiede besser detektierbar sind. Es ist ersichtlich, dass mit der pulsierenden Strömung ein um 13 % höherer Reinigungsgrad verglichen mit dem Reinigungsgrad der kontinuierlichen Strömung erreicht wird. Desweiteren ist in Abbildung 7-16 zu erkennen, dass für die Reinigung mit pulsierender Strömung 70 % an Reinigungsfluidvolumen im Vergleich zur Reinigung mit kontinuierlicher Strömung eingespart werden kann. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Reinigung mit pulsierender Strömung eine vielversprechende Methode ist.

7.3.5 Homogenität der Reinigung und Filter-Düse Abstand

In den vorhergehenden Untersuchungen (Abschnitt 7.3.2 bis 7.3.4) erfolgte die Auswertung immer im Zentrum des Gewebes. Um jedoch die Homogenität des Reinigungsprozesses zu klären, wurde die Bildauswertung jetzt nicht nur im Zentrum des Gewebes durchgeführt, sondern es erfolgten Aufnahmen an verschiedenen Positionen auf dem Gewebe. Zusätzlich zur Homogenität der Reinigung erfolgten Messungen bei unterschiedlichen Abständen zwischen Filtermedium und Düse. In Abbildung 7-17 sind die Abstände x und r_{Filter} schematisch dargestellt.

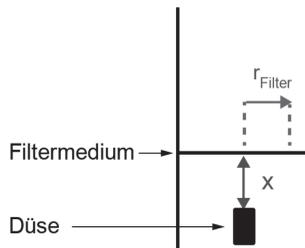


Abbildung 7-17: Schematische Darstellungen der Abstände x und r_{Filter}

In Abbildung 7-18 ist der Reinigungsgrad über dem Radius (r_{Filter}) entlang der Oberfläche des Filtermediums dargestellt.

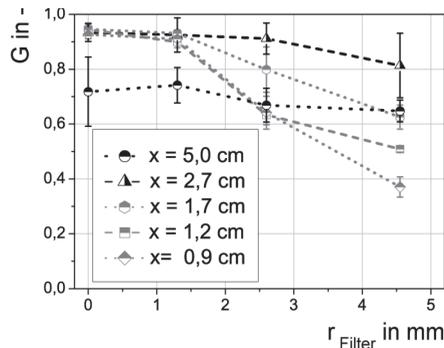


Abbildung 7-18: Homogenität der Reinigung bei pulsierender Strömung,;
 $t_{Puls} = 0,1$ s, $t_{Pause} = 0,5$ s; $v_{Pulse} = 15,4$ m/s, PET-22 kontaminiert mit $10 \mu\text{m}$
 Partikeln

Hierbei bedeutet ein Radius von 0 mm, dass der Reinigungsgrad im Mittelpunkt des Filter-mediums bestimmt wurde, ein Radius von beispielsweise 4,5 mm

bedeutet dagegen, dass die Bestimmung des Reinigungsgrades 4,5 mm vom Mittelpunkt entfernt erfolgte. Für das Filtermedium PET-22 (Abbildung 7-18) ist ersichtlich, dass mit steigendem Filter-Düse-Abstand der Reinigungsgrad abnimmt (vgl. dazu $x = 0,9$ cm und $x = 5$ cm). Zwischen $x = 0,9$ cm und $x = 2,7$ cm sind diese Unterschiede im Reinigungsgrad nicht so stark ausgeprägt. Des Weiteren ist aus der Abbildung erkennbar, dass für alle Filter-Düse-Abstände der Reinigungsgrad mit steigendem Filterradius r_{Filter} abnimmt. Bei Filter-Düse-Abständen zwischen 0,9 und 2,7 cm fällt auf, dass der Abfall des Reinigungsgrads entlang des Filterradius r_{Filter} bei großen Filter-Düse-Abständen viel steiler verläuft. Demnach hat die Kurve des Reinigungsgrads bei einem Abstand zwischen Filtermedium und Düse von $x = 0,9$ cm den stärksten Abfall zu verzeichnen. Bei der Kurve für einen Abstand von $x = 2,7$ cm ist die Abnahme des Reinigungsgrads für den betrachteten Bereich am Kleinsten.

Erklärbar ist dieses Phänomen mit der Aufweitung des pulsierenden Flüssigkeitsstrahls. In Abbildung 7-19 ist das Verhalten des Flüssigkeitsstrahls bei verschiedenen Filter-Düse Abständen dargestellt.

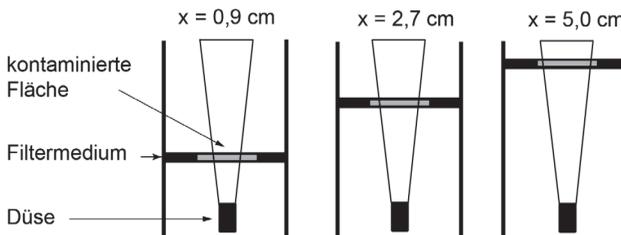


Abbildung 7-19: Düseneigenschaften für das Filtermedium PET-22 (Dicke 185 μ m). Die hellgraue Fläche stellt die kontaminierte Fläche dar.

Der hellgraue Bereich beschreibt die kontaminierte Fläche des Gewebes. Es ist ersichtlich, dass die Strahlaufweitung verantwortlich für das Reinigungsergebnis ist. Je größer der Abstand zwischen Düse und Filtermedium ist, desto größer ist die vom Pulsstrahl erreichte und gereinigte Fläche. Für einen Filter-Düse-Abstand von 5 cm sieht die Tendenz jedoch etwas anders aus. Der Reinigungsgrad ist über den Filterradius des Gewebes sehr homogen, er nimmt für diesen Abstand im Mittelpunkt des Gewebes einen Wert von 0,72 an und bei $r_{Filter} = 4,5$ cm beträgt der Reinigungsgrad 0,64. Bei Filter-Düse-Abständen zwischen 0,9 cm und 2,7 cm ist im Mittelpunkt ein Reinigungsgrad von 0,94 erkennbar (22 % höher als bei einem Filter Düse-Abstand von $x = 5$ cm). Der Grund für den geringen Reinigungsgrad bei einem Abstand von 5 cm liegt daran, dass bei höheren Abständen zwischen Filtermedium und Düse die Strö-

mungsgeschwindigkeit des Pulses durch die Reinigungsflüssigkeit (VE-Wasser), die unterhalb des Gewebes steht und wie eine Flüssigkeitssäule wirkt, abgeschwächt wird.

In Abbildung 7-20 sind die Untersuchungsergebnisse bezüglich der Homogenität des Reinigungsprozesses für die Filtermedien PEEK-12 (linkes Diagramm) und PET-12 (rechtes Diagramm) dargestellt. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad über dem Radius entlang des Filtermediums.

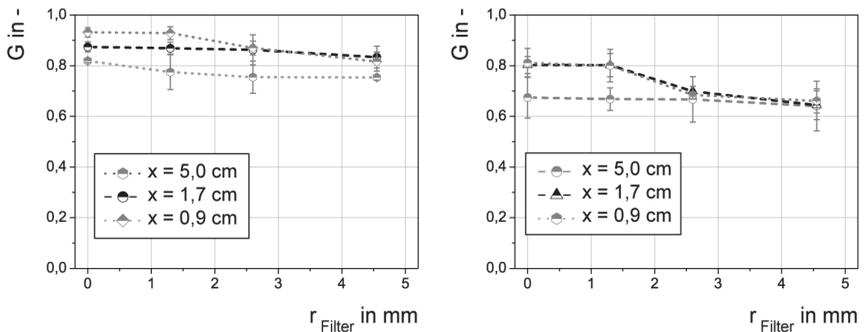


Abbildung 7-20: Homogenität der Reinigung mit pulsierender Strömung, $t_{Puls} = 0,1$ s; $t_{Pause} = 0,5$ s; $v_{Puls} = 15,4$ m/s; links: Filtermedium PEEK-12 (Filterdicke: $107 \mu\text{m}$), rechts: Filtermedium PET-12 (Filterdicke: $80 \mu\text{m}$), beide Gewebe waren mit $10 \mu\text{m}$ Partikeln kontaminiert

Es ist ersichtlich, dass für beide Filtermedien der Radius kaum einen Einfluss hat. Der Reinigungsgrad entlang der Filteroberfläche ist fast konstant. Beim Vergleich des Reinigungsgradverlaufs dieser Filtermedien mit dem PET-22-Gewebe, fällt auf, dass beim PET-22 ein viel geringerer Bereich des Gewebes homogen abgereinigt werden kann (vgl. Abbildung 7-18 und Abbildung 7-20). Zur Klärung der unterschiedlichen Homogenität der Filtermedien sind in Tabelle 7-3 die Filterdicke und die maximale Ausdehnung des Filters dargestellt. Während der Messung wurde die Ausdehnung mit einer Kamera aufgenommen, dann das Video in Einzelbilder zerlegt und die maximale Ausdehnung des Gewebes mithilfe der Software ImageJ gemessen.

Im Vergleich zum PET-22 sind das PEEK-12- und das PET-12-Gewebe viel dünner. Dies verursacht während des Reinigungsprozesses eine sichtbare Ausdehnung des Gewebes in Strömungsrichtung.

Tabelle 7-3 zeigt, dass die Ausdehnung mit geringer werdender Filterdicke zunimmt. Demnach hat das Filtermedium PET-22 die kleinste und das Filtermedium PET-12 die größte Ausdehnung.

Tabelle 7-3: Dicke und Ausdehnung der untersuchten Filtermedien; Abstand Düse zu Filtermedium: 17 mm; Pulsströmungsgeschwindigkeit $v_{\text{Puls}} = 11 \text{ m/s}$

Filtermedium	Dicke in μm	Maximale Ausdehnung in mm
PET-22	185	1,68
PEEK-12	107	2,0
PET-12	80	2,48

Durch die Ausdehnung des Filtermediums wird eine viel größere Fläche des Gewebes von der Strömung erreicht und somit kann auch ein größerer Bereich des Filters homogen gereinigt werden, was die homogenere Reinigung der Filtermedien PET-12 und PEEK-12 gegenüber dem PET-22 erklärt.

Aus Abbildung 7-20 geht ebenfalls hervor, dass nur ein geringer Einfluss des Filter-Düse-Abstandes erkennbar ist. Auch hier ist die Tendenz zu erkennen, dass mit steigendem Filter-Düse-Abstand die Homogenität der Reinigung verbessert wird. In Abbildung 7-21 ist das Verhalten der Filtermedien PET-12 und PEEK-12 während des Reinigungsprozesses schematisch dargestellt.

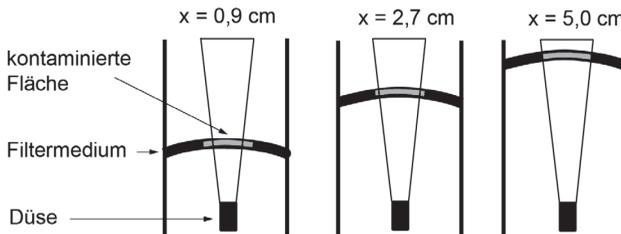


Abbildung 7-21: Ausdehnung der Filtermedien PET-12 und PEEK-12, der hellgraue Bereich beschreibt die kontaminierte Fläche.

Für einen Filter-Düse-Abstand von 0,9 cm und 2,7 cm wird durch die Ausdehnung des Gewebes ein viel größerer Bereich vom Pulsstrahl erreicht (vgl. Abbildung 7-21) und somit kann auch ein größerer Bereich des Gewebes gereinigt werden. Demnach müsste für einen Filter-Düse-Abstand von 5 cm die Reinigung am Homogensten sein. Dies bestätigt auch der Reinigungsgradverlauf in Abbildung 7-20.

7.3.6 Vergleich von Filtermedien unterschiedlicher Dicke

In Abbildung 7-22 ist der Vergleich zwischen den drei Filtermedien PET-22, PEEK-12 und PET-12 dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Kinetik des Reinigungsprozesses der drei Filtermedien. Für diese Untersuchungen wurde die Pulsströmungsgeschwindigkeit auf 15,4 m/s eingestellt. Die Experimente zeigen, dass das Filtermedium PEEK-12 das beste Reinigungsergebnis aufweist. PET-12 ist dagegen das am Schlechtesten zu reinigende Filtermedium.

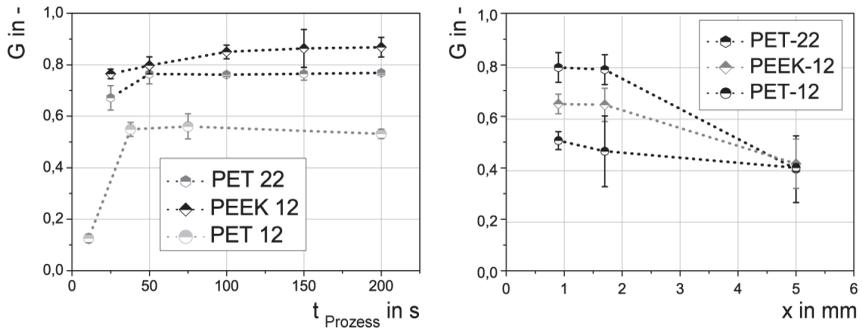


Abbildung 7-22: Vergleich der drei Filtermedien, links: Kinetik des Reinigungsprozesses ($t_{\text{Puls}} = 0,1$ s, $t_{\text{Pause}} = 2,9$ s), rechts: Reinigungsgrad für verschiedene Filter-Düse-Abstände (x) bei konstanter Porengeschwindigkeit (PET-22: $v_{\text{Puls}} = 15,4$ m/s, PEEK-12: $v_{\text{Puls}} = 15,4$ m/s, PET-12: $v_{\text{Puls}} = 11,9$ m/s)

Aufgrund der unterschiedlichen Porosität der drei Filtermedien (vergleiche Tabelle 4-2) existiert innerhalb der Maschen ein unterschiedliches Strömungsverhalten. Beispielsweise ist die Strömungsgeschwindigkeit in den Poren des Filtermediums PEEK-12 viel höher als in denen des PET-22, verursacht durch die kleinere Porosität des Filtermediums PET-22 (Porosität PET-22: 0,62, PEEK-12: 0,42). Um die drei Filtermedien besser miteinander vergleichen zu können, wurde bei den Experimenten im rechten Diagramm der Abbildung 7-22 die Strömungsgeschwindigkeit an die Porosität angepasst. Somit herrschen in den Poren der Gewebe die gleichen Strömungsgeschwindigkeiten.

Für die Filtermedien PET-22 und PEEK-12 wurden die Anströmgeschwindigkeiten auf 15,4 m/s gesetzt (beide haben eine Porosität von 0,62) und beim Filtermedium PET-12 (Porosität von 0,42) wurde die Strömungsgeschwindigkeit auf 11,9 m/s eingestellt. Das Diagramm stellt den jeweiligen Reinigungsgrad bei unterschiedlichen Filter-Düse-Abständen (x) dar. Beim Vergleich des Reinigungsgrades der drei Filtermedien für Abstände von 0,9 cm und 1,7 cm fällt auf, dass Filtermedium PET-22 das beste und Filtermedium PET-12 das schlechtes-

te Reinigungsverhalten aufweist. Dieses Verhalten hängt sehr stark mit der Filterausdehnung zusammen. PET-12 hat, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, die größte Ausdehnung und ist das Dünnste der untersuchten Filtermedien. Das schlechte Reinigungsergebnis lässt sich dadurch erklären, dass ein großer Teil der Pulsenergie in die Ausdehnung des Gewebes umgesetzt wird und somit nicht für die Partikelablösung zur Verfügung steht.

7.3.7 Einfluss des pH-Werts

Ein weiterer Faktor, der die Reinigung maßgeblich beeinflusst, ist der pH-Wert des Reinigungsfluides. Je nach Zetapotential der beiden Materialien (Filtergewebe und Partikel) kann es zur Abstoßung oder Anziehung kommen. Eine Anziehung beider Oberflächen würde eine Haftkraftverstärkung zur Folge haben, während eine Abstoßung sich auf das Reinigungsergebnis positiv auswirken würde. Dieser Abschnitt beschäftigt sich deshalb mit dem Einfluss des pH-Wertes des Reinigungsfluides auf das Reinigungsverhalten. Es sollen dabei auch die Randbereiche der Filtermedien genauer untersucht werden. In Abbildung 7-23 ist der Einfluss des pH-Wertes auf die Reinigungsfähigkeit des Filtermediums dargestellt.

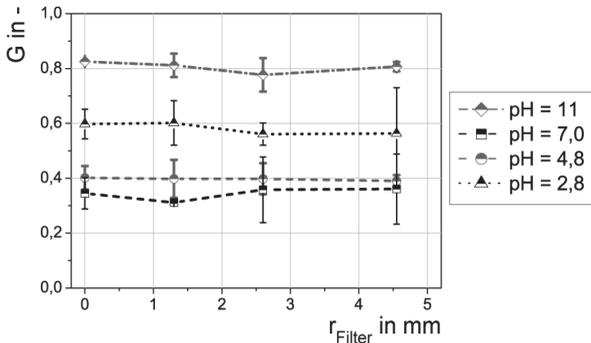


Abbildung 7-23: Einfluss des pH-Werts auf die Reinigung, Abstand Filtermedium-Düse: 5 cm, $t_{\text{Puls}} = 0,1$ s, $t_{\text{Pause}} = 2,9$ s, $v_{\text{Puls}} = 7,5$ m/s, Filtermedium PET-22, kontaminiert mit $10 \mu\text{m}$ Partikel

Der Abstand zwischen Filtermedium und Düse betrug 5 cm, die Pulspause lag bei 2,9 s und die Pulsdauer bei 0,1 s. Die Versuche erfolgten mit $10 \mu\text{m}$ -Partikeln und bei einer Pulsströmungsgeschwindigkeit von 7,5 m/s. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad über dem Radius entlang des Filtermediums. Es fällt auf, dass bei allen pH-Werten der Reinigungsgrad über den Radius des Filtermedi-

ums annähernd konstant ist. Bei unterschiedlichen pH-Werten sind jedoch auch unterschiedliche Reinigungsgrade zu beobachten. Dabei weisen die Versuche, die mit einem Reinigungsfluid des pH-Wertes von 11 durchgeführt wurden, die beste Reinigungsergebnisse auf ($G = 0,8$). Die schlechtesten Ergebnisse sind bei einem pH-Wert von 7,0 erkennbar. Um dieses Phänomen besser erklären zu können, ist es notwendig die Zetapotentiale von Filtergewebe und Partikel heranzuziehen.

In Abbildung 7-24 sind die Zetapotentiale von PET und den Melaminharz-Partikeln dargestellt. Das Zetapotential von PET ist aus der Literatur [110] entnommen und die Messung des Zetapotentials der Melaminharz-Partikel erfolgte mit dem Mikroelektrophoresegerät Laser Zee Meter, Modell 501 (Firma PEN KEM). Mit diesem Gerät werden die Wanderungsgeschwindigkeiten der kolloidalen Partikel im elektrischen Feld gemessen. Das Zetapotential wird dabei über die Smoluchowski-Näherung bestimmt. Zusätzlich ist in dem Diagramm noch der Reinigungsgradverlauf für einen Filter-Düse-Abstand von 5 cm aus Abbildung 7-23 dargestellt.

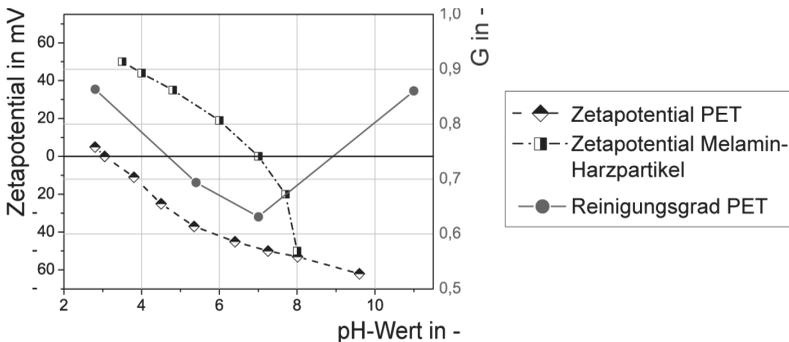


Abbildung 7-24: Zetapotential von PET und Melaminharz-Partikel, sowie der Reinigungsgrad bei einem Filter-Düse-Abstand von 5 cm: $t_{\text{Puls}} = 0,1$ s, $t_{\text{Pause}} = 2,9$ s, $v_{\text{Puls}} = 7,5$ m/s, PET-22 kontaminiert mit $10 \mu\text{m}$ Partikel

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Reinigungsgradverlauf mit dem Zetapotentialverlauf der beiden Materialien übereinstimmt. Der höchste Reinigungsgrad wird bei einem pH-Wert von 11 erreicht. In diesem Bereich, haben das Zetapotential von PET und von den Partikeln die gleichen Vorzeichen. Aus der Literatur (Abschnitt 3) ist bekannt, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen und ungleichnamige anziehen, weshalb dieses Ergebnis auch zu erwarten war. Der schlechteste Reinigungsgrad wird dagegen bei einem pH-Wert von 7 erreicht. Bei diesem pH-Wert haben die Oberflächen entgegengesetzte Ladungen,

was eine Anziehung zwischen Gewebe und Partikel zur Folge hat. Mit Kenntnis des jeweiligen Zetapotentials ist es somit möglich, eine qualitative Vorhersage der Reinigungsfähigkeit zu machen.

Auffällig ist des Weiteren (siehe Abbildung 7-23), dass mit einem Reinigungsfluid mit einem pH-Wert von 11 eine enorme Steigerung des Reinigungsgrades möglich ist. Im Vergleich zu VE-Wasser (pH-Wert von 5,4) erhöht sich der Reinigungsgrad um das Doppelte. Der Einfluss des pH-Wertes wurde auch bei kleineren Filter-Düse-Abständen untersucht (Abbildung 7-25). Aufgetragen ist der Reinigungsgrad über dem pH-Wert für einen Filter-Düse-Abstand von 1,7 cm. Auch hier wird das beste Reinigungsergebnis bei einem pH-Wert von 11 und das schlechteste bei einem pH-Wert von 7 erzielt. Der Abfall des Reinigungsgradverlaufs entlang des Filtrerradius verläuft bei pH 11 viel flacher als bei pH 5,4 (VE-Wasser). Die Zetapotentiale der beiden Oberflächen haben bei pH 11 gleiche Vorzeichen, das heißt die Oberflächen stoßen sich ab. Dadurch kommt es zu einer Verminderung der Haftkraft zwischen Partikel und Gewebe und somit können die Randstellen des Gewebes, bei denen die Strömungskraft geringer ist, bei pH 11 besser gereinigt werden als mit VE-Wasser.

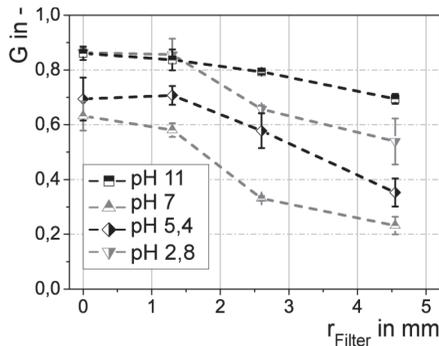


Abbildung 7-25: Einfluss des pH-Werts auf die Reinigung; Abstand Filtermedium-Düse: 1,7 cm, $t_{\text{Puls}} = 0,1$ s, $t_{\text{Pause}} = 2,9$ s, $v_{\text{Puls}} = 7,5$ m/s, PET-22, kontaminiert mit $10 \mu\text{m}$ Partikel

Die Untersuchung der pH-Wert-Variationen zeigt, dass unter Kenntnis des Zetapotentialverlaufes von Substrat (Gewebe) und Verunreinigung (Partikel) durch Wahl eines Reinigungsmediums mit optimalem pH-Wert das Reinigungsergebnis positiv beeinflusst werden kann. Ebenso kann dadurch ein konstant hoher Reinigungsgrad über die gesamte Filterfläche erreicht werden, da beim optimalen pH-Wert eine signifikante Haftkraftreduzierung stattfindet.

7.3.8 Dimensionsanalyse

Auch für die pulsierende Reinigung erfolgte eine Dimensionsanalyse, um die Kennzahlen zu erarbeiten, die das betrachtete System beschreiben. In Tabelle 7-4 sind alle Parameter aufgelistet, die die Reinigung mit pulsierender Strömung beeinflussen.

Tabelle 7-4: Parameter für die Dimensionsanalyse

Parameter	Einheit	Einfluss auf den Reinigungsgrad G
Pulspause t_{Pause}	(s)	$t_{Pause} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Kinematische Viskosität des Fluids ν_{Fluid}	(m^2/s^2)	$\nu_{Fluid} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Strömungsgeschwindigkeit in Pore $\frac{\nu_{Puls}}{\epsilon} t$	(m/s)	$\frac{\nu_{Puls}}{\epsilon} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Dicke des Filtermediums l_{Dicke}	(m)	$l_{Dicke} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Mantelfläche des Filtermediums A_{Gewebe}	(m^2)	-
Webart l_{Gewebe}	(m)	$l_{Gewebe} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Prozesszeit $t_{Prozess}$	(s)	$t_{Prozess} \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Partikeldurchmesser d_p	(m)	$d_p \uparrow \rightarrow G \uparrow$
Anteil abgelöster Partikel $1 - \frac{N_L,Partikel}{N_0,Partikel}$	1	-

Nach Tabelle 7-4 sind acht dimensionsbehaftete Parameter, die das System beeinflussen, und zwei Grundeinheiten vorhanden. Gemäß dem PI-Theorem [97] lassen sich somit sechs dimensionslose Kennzahlen bilden. Das weitere Vorgehen zeigte jedoch, dass für den empirischen Ansatz zur Bestimmung des Reinigungsgrades davon nur vier Kennzahlen ausschlaggebend sind. Deshalb wird im Folgenden auch nur auf die relevanten Kennzahlen eingegangen.

Für das betrachtete System ergibt sich somit neben dem Reinigungsgrad G , der V_p -Zahl und der Geometrie-Zahl C , die schon in Abschnitt 7.2.6 eingeführt wurden, eine weitere Kennzahl N_{Pause} , die den Einfluss der Pulspause berücksichtigt. Sie ist das Verhältnis aus der Prozesszeit $t_{Prozess}$ und der Pulspause t_{Pause} . In Abschnitt 7.3.2 wurde deutlich, dass nach einer Prozesszeit von 100 s der Reinigungsgrad einen konstanten Wert annimmt. Deshalb wurde als Maximal-

wert für $t_{\text{Prozess}} = 100$ s eingesetzt. N_{Pause} setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

$$N_{\text{pause}} = \frac{t_{\text{Prozess}}}{t_{\text{pause}}} \quad 7-13$$

Da die Versuche zur pulsierenden Reinigung eine größere Abhängigkeit der Filterdicke vom Reinigungsgrad aufwies, ergab sich die Re-Zahl wie folgt:

$$Re = \frac{v_{\text{Puls}} \cdot l_{\text{Dicke}}}{\varepsilon \cdot \nu_{\text{Fluid}}} \quad 7-14$$

Mit diesen vier dimensionslosen Kennzahlen und mithilfe der Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt ergibt sich folgende Zahl W_{Puls} :

$$W_{\text{Puls}} = Re^2 \cdot N_{\text{pause}}^{0,5} \cdot C^{0,6} \cdot V_p \quad 7-15$$

Die experimentellen Daten zeigen, dass die Strömung einen exponentiellen Einfluss auf das Reinigungsverhalten hat, weshalb die Reynolds Zahl quadriert wurde. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss, der durch das Gewebe und die Pulspause hervorgerufen wird, geringer. Deshalb wurde für N_{Pause} der Exponent 0,5 und für C der Exponent 0,6 gewählt.

Abbildung 7-26 zeigt alle experimentellen Daten und die zugehörige Zahl W_{Puls} .

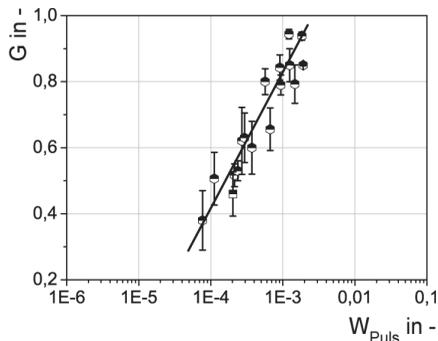


Abbildung 7-26: Korrelation zwischen Reinigungsgrad und W_{Puls} aller experimenteller Daten

Die dargestellten Daten beinhalten sowohl Versuche mit $5 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ Partikeln. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad über der Zahl W_{Puls} (einfach-logarithmische Auftragung). Es fällt auf, dass W_{Puls} die gleiche Tendenz auf-

weist wie der Reinigungsgrad G . Die experimentellen Daten können mit folgender Funktion beschrieben werden (Näherungsformel):

$$G = 0.1597 \cdot \ln(W_{Puls}) + 1.8972 \quad 7-16$$

Nun ist es mit Gleichung 7-16 und 7-15 möglich, auf den Reinigungsgrad zurückzurechnen. In Abbildung 7-27 wurden der experimentelle Reinigungsgrad $G_{\text{experimentell}}$ und der berechnete Reinigungsgrad $G_{\text{berechnet}}$ über die verschiedenen Experimente die im Anhang C(Tabelle C-3) aufgeführt sind, aufgetragen.

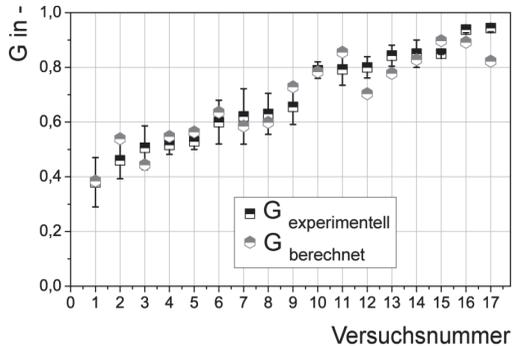


Abbildung 7-27: Vergleich des experimentellen Reinigungsgrades $G_{\text{experimentell}}$ und des berechneten Reinigungsgrades $G_{\text{berechnet}}$ (Versuchsnummern siehe Tabelle C-3)

Die berechneten und die experimentellen Reinigungsgrade stimmen sehr gut überein. Somit kann abschließend gesagt werden, dass die Kennzahl W für die Vorhersage des Reinigungsergebnisses gut geeignet ist. Trotz der recht guten Übereinstimmung zwischen experimentellen und berechneten Daten weist diese Methode jedoch einige Nachteile auf. Sie ist beispielsweise für nicht gewebte Strukturen ungeeignet. Bei nicht gewebten Strukturen wäre es notwendig, die charakteristische Länge l_{Gewebe} neu zu definieren, da diese keine geometrisch geordnete Struktur haben. Des Weiteren ist dieser Zusammenhang bisher nur für das System Melaminharzpartikel/ Polymergewebe geeignet.

8 Ablösemechanismen bei der Reinigung

Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 und 7.3.3 gezeigt, weist die Reinigung einer partikulären Verunreinigung sowohl bei kontinuierlicher Strömung, als auch bei pulsierender Strömung eine Zeitabhängigkeit auf. In beiden Abschnitten wurde bereits angedeutet, dass die Zeitabhängigkeit in unterschiedlichen Ablösemechanismen bei der Reinigung der Partikel während des Prozesses begründet ist. In der Literatur ist die Ablösung partikulärer Systeme von einfachen Oberflächen wie in Abschnitt 2.3.3 ausführlich beschrieben, gut dokumentiert. Diese Untersuchungen fanden jedoch an glatten Oberflächen statt. Um die Annahme der Partikelbewegung während der Reinigung von Filtergeweben weiter zu verifizieren, wurde eine Versuchsmethodik entwickelt, deren Vorgehen in diesem Abschnitt genau beschrieben ist. Diese Methodik ermöglicht es zum einen, Aussagen über die kritischen Reinigungsstellen auf dem Gewebe und zum anderen über die Partikelbewegung während der Reinigung zu machen.

8.1 Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung

Als Kontaminierung kamen die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Partikel zum Einsatz. Die Auswertung erfolgte auch hier durch Auszählen der Partikel auf dem Gewebe. Dazu waren pro Aufnahme zwei Bilder vom identischen Bildausschnitt (vor und nach Reinigung jeweils ein Bild) notwendig. Da sowohl bei der Reinigung mithilfe kontinuierlicher, als auch mithilfe pulsierender Strömung das Filtermedium immer durchströmt wurde, war es nicht möglich, Aufnahmen des Gewebes während des Reinigungsprozesses zu machen. Deshalb mussten die Mikroskop-Bilder offline, also nach jedem Reinigungsversuch aufgenommen werden. Dabei wurde nach jedem Experiment das Gewebe vorsichtig aus der Filterhalterung herausgenommen, unter das Fluoreszenzmikroskop gelegt und dann die Aufnahmen gemacht.

Für eine reproduzierbare Versuchsdurchführung ist eine reproduzierbare Kontamination mit folgenden Anforderungen notwendig:

- gleichmäßige Verteilung der Partikel auf dem Filtermedium,
- kein gegenseitiger Kontakt der kontaminierten Partikel (Partikel sollen als Einzelpartikel vorliegen),
- die Rückseite des Filtermediums soll nicht mit Partikeln bedeckt sein, um zu verhindern, dass bei der Reinigung Partikel von der Rückseite auf die Vorderseite gelangen und diese dann mit ausgewertet werden.

Deshalb wurde die Kontaminierung nicht mit der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Kontaminierungseinheit durchgeführt, sondern es wurde ein Rotator (siehe Abschnitt 5.3.3) für die Kontaminierung eingesetzt. Das Filtermedium wurde mit der kontaminierten Seite nach oben in die Kontaminierungszelle eingesetzt (Abbildung 5-9 a)), wobei die untere Hälfte zuvor mit VE-Wasser unter Ausbildung eines Meniskus befüllt wurde. Danach wurde das obere Zylinderrohrstück aufgeschraubt und der obere Teil mit 10 ml VE-Wasser aufgefüllt. Nach Zugabe von 10 μ l der 5 %-igen (Massenprozent) Partikelsuspension wurde der Zylinder mit einem Reagenzglasstopfen verschlossen, an den Rotator (mit Klettverschluss siehe Abbildung 5-9 b)) angebracht und für 5 min gestartet. Danach erfolgte eine zügige Entleerung der Zelle, indem die Stopfen der Zelle entfernt wurden. Die Trocknung des Filtermediums fand im Trockenschrank bei 30°C für 30 min statt. Diese Prozedur ermöglichte es, eine Kontaminierung mit den oben genannten Anforderungen zu erzielen.

8.2 Auswertung der Versuche

Bei jedem Versuch wurden Mikroskopaufnahmen nach der Kontamination und nach dem Reinigungsprozess gemacht. Für die Auswertung wurde eine sehr umfangreiche MATLAB-Applikation erstellt, die eine Bildoptimierung (Helligkeit, Kontrast, Binärbild) beinhaltet, die Partikelpositionen vor und nach der Reinigung erkennt, die Anzahl der Partikel bestimmt und deren Bewegung zuordnen kann. Im Folgenden ist diese Analyse näher erläutert.

8.2.1 Bildbearbeitung in MATLAB

Um die Bewegung eines Partikels bei der Reinigung zu bestimmen, ist es notwendig, dass die beiden Bilder vor und nach der Reinigung exakt den identischen Bildbereich zeigen. Da das Gewebe unter dem Mikroskop aber nicht so exakt positioniert werden kann, ist eine geometrische Transformation der Bilder

notwendig. Hierfür steht in MATLAB das Tool Control Point Selection zur Verfügung. Damit ist es möglich, per Mausklick auf beiden Bildern mindestens vier Referenzpunkte (control points) zu markieren, um dann die beiden Bilder übereinander zu projizieren.

In Abbildung 8-1 a)-d) sind die verschiedenen Schritte der Bildbearbeitung dargestellt. Hierbei wurden die RGB-Bilder (Abbildung 8-1 a) in ein HSV-Modell konvertiert (Abbildung 8-1 b). Beim HSV-Modell wird die Farbe mithilfe des Farbwerts (H) (Farbwinkel auf dem Farbkreis), der Farbsättigung (S) (Werte von 0 bis 1) und dem Hellwert (V) (Werte von 0 bis 1) beschrieben. Durch Maximieren des Hellwertes erfolgte der Ausgleich der ungleichmäßigen Belichtung des Ausgangsbildes. Der nächste Schritt bestand in der Umwandlung des HSV-Bildes in ein Graustufenbild und dann in ein Schwarzweißbild (Abbildung 8-1 c). Vor den anschließenden Prozessschritten (Zählen der Bilder, Trennen eventuell zusammenhängender Objekte) erfolgte eine Invertierung des Schwarzweißbildes. Somit erhielten alle vorher schwarzen Objekten den Pixelwert 1. Danach erfolgten weitere Operationen in MATLAB, die das Binärbild dahingehend verbesserten, dass die Positionsbestimmung der Partikel so fehlerfrei wie möglich abließ (Glättung der Partikelränder, Auffüllen der Partikel, Abbildung 8-1 d)).

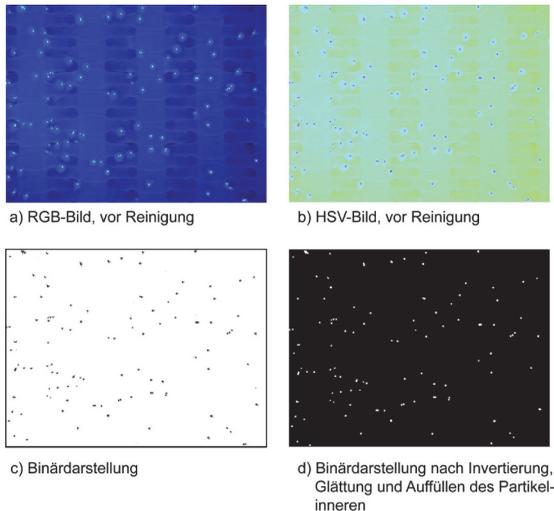


Abbildung 8-1: Einzelne Schritte der Bildbearbeitung mit MATLAB

Da die fluoreszierenden Partikel aufgrund ihrer Leuchtintensität viel größer erscheinen als sie tatsächlich sind, konnte es passieren, dass mehrere Partikel,

die sich nicht berühren, sondern nur sehr nahe beieinander lagen, auf den bearbeiteten Bildern ein einziges Objekt darstellten. Das führte bei der späteren Partikelanzählung zu Fehlern. Eine Methode, um zusammenhängende Objekte zu trennen, ist die Wasserscheidenmethode, die nur für Bilder mit einer Grauwertinformation angewendet werden kann. Dabei stellen die verschiedenen Grauwertintensitäten unterschiedliche Höheninformationen dar und die Bereiche mit den geringsten Intensitäten verkörpern Staubecken, die nach und nach geflutet werden. Zwischen benachbarten Objekten bilden sich hierbei Wasserscheiden aus, die Objekte voneinander getrennt darstellen lassen. Da die Methode jedoch nur auf Grauwertbilder angewendet werden kann und es sich bei den vorhandenen Bildern um Binärbilder handelte, war im Vorfeld eine Distanztransformation der Binärbilder notwendig. Dabei erfolgte für jedes Pixel aller Objekte (in unserem Fall die weißen Objekte auf dem Binärbild) die Berechnung des kürzesten Abstandes zum Hintergrund (schwarze Pixel auf dem Binärbild), welcher für die Grauwertinformation steht. Somit entstand ein Grauwertbild, auf das die Wasserscheidenmethode angewendet werden konnte. Alle Pixel einer Wasserscheide bekamen die Intensitätswerte 0 zugeordnet und die Bildpunkte der gefundenen „Regionen“ wurden mit ganzen Zahlen ≥ 1 bezeichnet. So erhielten alle Pixel der ersten Region den Intensitätswert 1, die der zweiten den Wert 2 und so weiter. Somit konnte die Summe aller Partikel bzw. Objekte im Bild ausgegeben werden. Die Bestimmung der Partikelposition erfolgte dann über eine weitere Operation in MATLAB, die die Massenschwerpunkte aller gefundenen Regionen ausgab.

Da nicht immer alle Partikel mit der Wasserscheidentransformation getrennt werden konnten, wurde eine manuelle Überarbeitung eingeführt, die es ermöglichte Partikel manuell zu trennen. Ebenso war es mit dieser Operation möglich, andere Verschmutzungen auf dem Gewebe, wie beispielsweise Fasern, zu entfernen. Alle Daten (Anzahl und Position der Partikel) wurden in einer Excel-datei gespeichert.

Mithilfe dieser Analyse war es zum einen möglich, den Reinigungsgrad (Anteil der abgetrennten Partikel) des Gewebes zu bestimmen und zum anderen Partikelbewegungen, die während der Reinigung stattfanden, zu detektieren und zu bewerten.

8.2.2 Auswertung der Daten aus der Bildbearbeitung

Um die kritischen Stellen der Filtermedien (Stellen mit sehr geringem Reinigungsgrad) und die Partikelbewegungen bei der Reinigung aufklären zu können, wurde das Gewebe in vier Zonen eingeteilt, deren Auswertung getrennt erfolgte. In Abbildung 8-2 sind die einzelnen Zonen dargestellt.

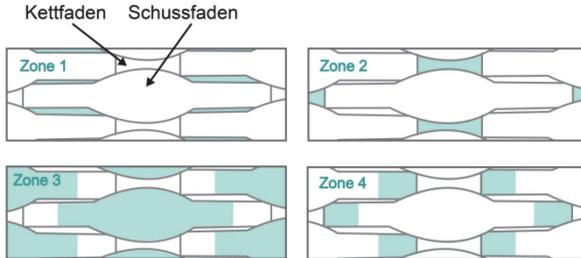


Abbildung 8-2: Einteilung des Gewebes in 4 Zonen; die einzelnen Zonen sind türkis markiert

Für eine detaillierte Untersuchung von Zone 2 wurde eine Ortsvariable (y) definiert (Abbildung 8-3.) Die Variable y beschreibt den Abstand von der Mittellinie des Schussfadens. Der maximale Abstand beträgt hierbei $86,7 \mu\text{m}$.

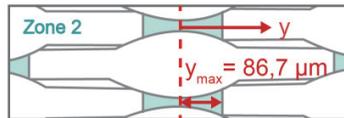


Abbildung 8-3: Unterteilung der Zone 2

Die Reinigungsgradbestimmung der Zone 2 erfolgte in den drei folgenden Bereichen:

- $|y| \leq 20 \mu\text{m}$
- $20 \mu\text{m} < |y| < 55 \mu\text{m}$
- $|y| \geq 55 \mu\text{m}$

Mit dieser Betrachtungsweise ist es möglich, die Stelle des Fadens in Zone 2 mit der besten bzw. schlechtesten Reinigungsfähigkeit zu finden.

Da der Kettfaden in Zone 3 einen Höhenbereich von über $100 \mu\text{m}$ durchläuft, ist es sinnvoll, die Reinigungsfähigkeit von Partikeln unterschiedlicher Höhenposi-

onen (h) zu betrachten. Dazu erfolgten Höhenmessungen mit einem Laser Scanning-Mikroskop (Keyence, Japan). Die damit erhalten Höhendaten konnten in MATLAB eingelesen werden und wurden danach so bearbeitet, dass dem höchsten Punkt der Zone der Wert $0 \mu\text{m}$ zugewiesen wurde. Alle anderen Pixel bekamen dann entsprechend Werte $< 0 \mu\text{m}$. In Abbildung 8-4 ist die Zone 3 mit Höheninformation dargestellt.

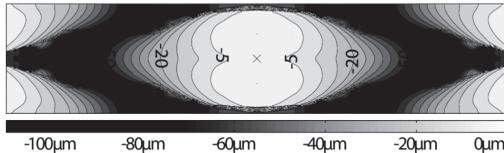


Abbildung 8-4: Zone 3 mit Höheninformation

Für die Analyse der Reinigungsfähigkeit erfolgte vor und nach der Reinigung die Betrachtung drei verschiedener Höhenbereiche (h):

- $h \geq -5 \mu\text{m}$
- $-5 \mu\text{m} > h > -20 \mu\text{m}$
- $h \leq -20 \mu\text{m}$

Um Herauszufinden, ob Partikelbewegungen stattgefunden haben, mussten die Positionen der Partikel vor mit denen nach der Reinigung verglichen werden. Taucht an einer Stelle auf der Faser, an der vor der Reinigung kein Partikel war, nach der Reinigung ein Partikel auf, spricht das für eine Partikelbewegung. Im Rahmen dieser Untersuchungen war es jedoch, aufgrund der erschwerten Partikelzuordnung bei einer indirekten Auswertemethodik, nicht möglich, Aussagen über die Weglänge bzw. Richtung der Partikelbewegungen zu machen.

Vorversuche haben gezeigt, dass vermeintliche Partikelbewegungen bis zu $10 \mu\text{m}$ (gemessen von Partikelmittelpunkt zu Partikelmittelpunkt) keine Bewegungen der Partikel darstellen. Dies ist auf die geometrische Transformation zurückzuführen, bei der die Synchronisierung der Bilder manuell über vier Punkte auf dem Gewebe erfolgt. Dies wurde durch eine Fehlerabschätzung bestätigt, die ergab, dass Messungenauigkeiten von bis $10 \mu\text{m}$ bei der Bildtransformation auftreten können. Partikelbewegungen kleiner $10 \mu\text{m}$ werden deshalb im Rahmen dieser Untersuchungen als unbewegt behandelt.

8.2.3 Bestimmung des Reinigungsgrades

Für Betrachtungen der Reinigungsfähigkeit in den einzelnen Zonen wurde ein Gesamtzonenreinigungsgrad ($G_{ges, z}$) eingeführt. Er setzt die Gesamtpartikelanzahl aller Versuche ($i = 1 \dots m$) nach der Reinigung ($N_{t, z, Partikel, i}$) denen vor der Reinigung ($N_{0, z, Partikel, i}$) innerhalb der Zone (Z) ins Verhältnis. Bei jedem Prozessparameteransatz erfolgten insgesamt 12 Versuche ($m = 12$).

$$G_{ges, z} = 1 - R_{ges, z} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m N_{t, z, Partikel, i}}{\sum_{i=1}^m N_{0, z, Partikel, i}}. \quad 8-1$$

Bei Betrachtung des gesamten Filtergewebes wird der Reinigungsgrad (G_{ges}) verwendet:

$$G_{ges} = \sum_{Z=1}^4 G_{ges, z}. \quad 8-2$$

8.2.4 Bestimmung des Partikelbewegungsanteils

Von Bedeutung ist, neben der Reinigungsfähigkeit, auch die Partikelbewegung in den einzelnen Zonen, die für die Zeitabhängigkeit des Prozesses verantwortlich sein kann. Dazu wurden die Bewegungen aller zurückgebliebenen Partikel innerhalb einer Zone betrachtet. Zur Beurteilung wurde der Anteil an bewegten Partikeln ($A_{Bewegung, z}$) in der Zone (Z) berechnet:

$$A_{Bewegung, z} = \frac{\sum_{i=1}^m N_{z, Bewegung, i}}{\sum_{i=1}^m N_{0, z, Partikel, i}}. \quad 8-3$$

Hierbei ist $N_{z, Bewegung, i}$ die Anzahl der Partikel, die sich während der Reinigung bewegt haben und $N_{t, z, Partikel, i}$ die Zahl der Partikel, die nach der Reinigungszeit t in Zone Z zurückgeblieben sind. $A_{Bewegung, z}$ wird mithilfe aller durchgeführten Versuche ($i = 1 \dots m$) bestimmt. Ebenfalls interessant ist der Anteil der Partikel, die während der Reinigung ihre Position nicht geändert haben. Dieser Anteil wird mit $A_{Haftung, z}$ beschrieben. Er ist definiert durch:

$$A_{Haftung, z} = \frac{\sum_{i=1}^m N_{z, Haftung, i}}{\sum_{i=1}^m N_{0, z, Partikel, i}}. \quad 8-4$$

$N_{z, Haftung, i}$ beschreibt die Anzahl der Partikel, die sich während der Reinigung innerhalb der Zone Z nicht bewegt haben. Bei Betrachtung des gesamten Gewebes ergeben sich somit folgende Anteile bewegter bzw. haftender Partikel:

$$A_{\text{Bewegung}} = \sum_{Z=1}^4 A_{\text{Bewegung},Z} \quad 8-5$$

$$A_{\text{Haftung}} = \sum_{Z=1}^4 A_{\text{Haftung},Z} \quad 8-6$$

8.3 Untersuchung der Ablösemechanismen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Untersuchung der Ablösemechanismen für die kontinuierliche und pulsierende Strömung dargestellt. Die meisten Experimente erfolgten mit einem konstanten Massenstrom von 30 g/s und für verschiedene Prozesszeiten bzw. Pulsanzahlen. Bei der pulsierenden Strömung wurde Pulsdauer und Pulspause auf 0,5 s eingestellt. Die eingesetzten Anlagen wurden bereits in Abschnitt 5.1 bzw. 0 vorgestellt. Ein Ziel dieser Versuche war es, die Ablösemechanismen und kritischen Reinigungsstellen bei beiden Methoden aufzuklären, nicht aber die Strömungsarten zu vergleichen. Letzteres ist nicht möglich, da beide Anlagen einen komplett unterschiedlichen Aufbau besitzen. Für diesen Vergleich wurden deshalb anschließend beide Strömungsarten mit der Anlage zur pulsierenden Reinigung realisiert. Dabei wurde die kontinuierliche Strömung über das Magnetventil gesteuert, das für diesen Fall die komplette Prozesszeit offen blieb. Im letzten Abschnitt werden die Ablösemechanismen (direktes Ablösen der Partikel oder Ablösen nach Partikelbewegung) in Zusammenhang mit der Prozesszeit und der Filtergeometrie gebracht.

8.3.1 Reinigungsfähigkeit der unterschiedlichen Zonen

Um herauszufinden, welcher Bereich des Gewebes die beste bzw. die schlechteste Reinigungsfähigkeit aufweist, erfolgte die Auswertung des Reinigungsgrades in den unterschiedlichen Zonen. Dazu wurde der Gesamtzonenreinigungsgrad ($G_{\text{ges.},Z}$) herangezogen. In Abbildung 8-5 sind links die Ergebnisse für die kontinuierliche und rechts für die pulsierende Strömung dargestellt. Aufgetragen ist der Gesamtzonenreinigungsgrad ($G_{\text{ges.},Z}$) über den verschiedenen Zonen (Z) für drei unterschiedliche Prozesszeiten bzw. drei unterschiedliche Pulsanzahlen. Aus dem linken Diagramm ist ersichtlich, dass für alle Prozesszeiten ($t = 10$ s, 20 s, 45 s) der Reinigungsgrad in den unterschiedlichen Zonen eine ähnliche Tendenz besitzt. In Zone 1, 2 und 4 ist zwischen 20 s und 45 s ein Zeiteinfluss erkennbar. Mit steigender Prozesszeit nimmt der Reinigungsgrad zu. Ebenso geht aus dem Diagramm hervor, dass Zone 1 und 4 bei allen Reinigungszeiten

die besten Reinigungsfähigkeiten aufweisen. Der Reinigungsgrad nimmt hier Werte zwischen 0,7 und 0,85 an. Diese Bereiche sind von der Strömung am besten erreichbar und es wirken die höchsten Wandschubspannungen. Der Reinigungsgrad fällt in Zone 2 auf Werte zwischen 0,65 und 0,75 ab. Diese Zone lässt sich also etwas schlechter reinigen als Zone 1 und 4. Für Zone 3 gelten diese Tendenzen jedoch nicht. Hier wird bei allen drei Prozesszeiten ein Reinigungsgrad von nur 0,28 erreicht. Die kritischen Reinigungsstellen befinden sich folglich auf den Fasern des Gewebes, die sich auf der strömungsabgewandten Seite befinden. Nach Stahl et al. [66], die Strömungssimulationen an einem Drahtgewebe durchgeführt haben, tritt genau an diesen Stellen ein Rückströmgebiet auf und die Wandschubspannungen, die auf die Partikel wirken, sind in diesem Bereich sehr gering. Somit reichen hier die Strömungs-Kräfte nicht aus, um die Partikel abzulösen.

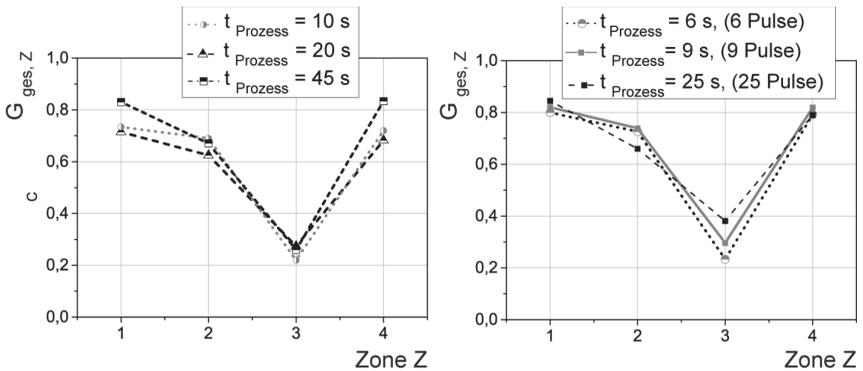


Abbildung 8-5: Reinigungsfähigkeit in den unterschiedlichen Zonen, links: kontinuierliche Strömung; rechts: pulsierende Strömung

Für die pulsierende Reinigung (rechtes Diagramm) sehen die Tendenzen etwas anders aus. Hier sind in Zone 1, 2 und 4 kaum Unterschiede im Reinigungsgrad für unterschiedliche Pulsanzahlen zu erkennen. Bereits nach drei Pulsen ist der Endzustand der Reinigung erreicht. In Zone 3 ist zwischen 6 und 25 Pulsen jedoch ein Unterschied im Reinigungsgrad von 15% zu erkennen. Je höher die Zahl der aufeinanderfolgenden Pulse umso höher ist der Reinigungsgrad. Durch die Pulse wird das Fluid ständig beschleunigt und es bilden sich Wirbel aus, die auch die Partikel auf der Oberseite der Faser erreichen und ablösen können. Insgesamt ist der Reinigungsgrad in dieser Zone jedoch trotzdem noch sehr gering.

Zone 2 wurde im Rahmen dieser Untersuchungen detaillierter betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8-6 dargestellt. Aufgetragen ist der Reinigungsgrad ($G_{ges,2}$) über die Position (y). In der Abbildung sind im linken Diagramm die Ergebnisse für die kontinuierliche Reinigung und im rechten Diagramm für die pulsierende Reinigung dargestellt. Bei beiden Verfahren sind die gleichen Tendenzen erkennbar. Mit steigendem Abstand von der Mittelachse ergibt sich ein höherer Reinigungsgrad. Am Rand der Faser wirkt auf die Partikel eine größere Strömungskraft als in der Mitte der Faser, was zu einem besseren Reinigungsergebnis am Randbereich führt. Für die kontinuierliche Strömung ist eine erhebliche Zeitabhängigkeit für $|y| < 20 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m} \leq |y| \leq 55 \mu\text{m}$ erkennbar. Am Rand der Faser ($|y| > 55 \mu\text{m}$) ist jedoch nur eine geringe Abhängigkeit von der Prozesszeit zu beobachten. Es ist anzunehmen, dass in diesem Bereich alle ablösbaren Partikel schon ab 15 s von der Strömung erfasst und abgetragen werden.

Für die pulsierende Strömung sehen die Tendenzen dagegen etwas anders aus. In der Nähe der Mittelachse ($|y| < 20 \mu\text{m}$) ist nur eine geringe Zeitabhängigkeit zwischen 3 und 9 s zu erkennen, während am Rand der Faser ($|y| > 55 \mu\text{m}$) der Zeiteinfluss größer wird.

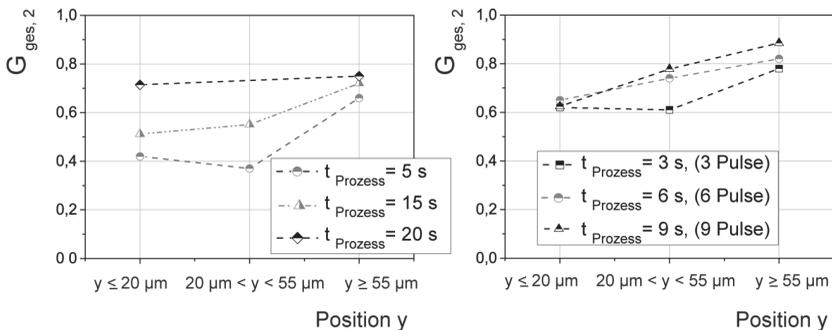


Abbildung 8-6: Reinigungsfähigkeit in Zone 2, links: kontinuierliche Strömung; rechts: pulsierende Strömung

Da Zone 3 die schlechtesten Reinigungsergebnisse aufweist (Abbildung 8-6), erfolgt hier ebenfalls eine detaillierte Untersuchung (Abbildung 8-7). Aufgetragen ist hier der Reinigungsgrad ($G_{ges,3}$) über der Position (h) für Prozesszeiten von 10 und 20 s (kontinuierliche Strömung) bzw. für 6 und 25 Pulse (pulsierende Strömung). Bei beiden Verfahren ist ersichtlich, dass je höher die Partikel auf der Faser liegen, umso schlechter ist der Reinigungsgrad. Je näher sie an der Umschlingung des Kettfadens liegen, desto besser sind sie zu ablösen. Am

höchsten Punkt der Faser bildet sich ein Rückströmgebiet aus [2, 66], es wirken nur geringe Strömungskräfte auf die dort lokalisierten Partikel. Des Weiteren ist beim Vergleich der beiden Prozesszeiten erkennbar, dass mit steigender Prozesszeit die Reinigungsfähigkeit im untersuchten Prozessbereich besser wird. Bei der pulsierenden Strömung ist zu beobachten, dass für die Reinigung der Partikel, die auf der Faseroberfläche ($h \geq -5 \mu\text{m}$) lokalisiert sind, keine Zeitabhängigkeit vorhanden ist.

Das bedeutet, dass die Partikel, die bei der verwendeten Pulsströmungsgeschwindigkeit abgereinigt werden können, schon spätestens nach 6 Pulsen abgelöst werden. Bei Höhenpositionen kleiner $-5 \mu\text{m}$ ist jedoch wiederum eine Zeitabhängigkeit erkennbar. In diesem Bereich hat die wiederholte Beschleunigung der Strömung einen Einfluss auf das Reinigungsergebnis

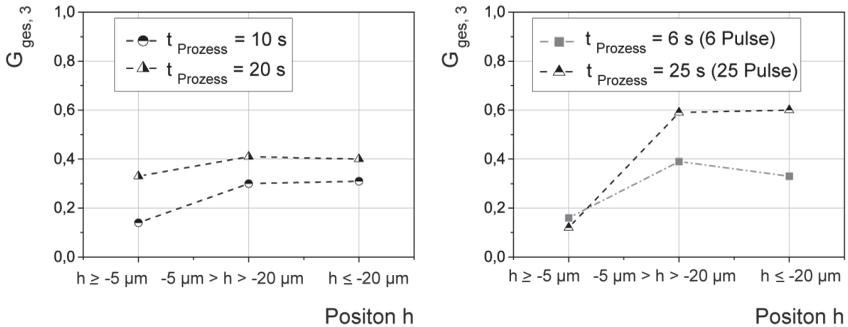


Abbildung 8-7: Reinigungsfähigkeit in Zone 3, links: kontinuierliche Strömung, rechts: pulsierende Strömung

In Abbildung 8-8 sind die Ergebnisse des Vergleichs der beiden Verfahren zonenabhängig dargestellt. Die Versuche mithilfe kontinuierlicher und pulsierender Strömung erfolgten bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit (4 m/s) und konstantem Volumen an Reinigungsfluid (135 ml). Dafür wurde für die Untersuchungen der Strömungsart die Anlage zur pulsierenden Reinigung (Abschnitt 5.2) verwendet. Für die pulsierende Reinigung wurde wieder eine Pulsdauer und Pulspause von jeweils 0,5 s gewählt.

Es ist ersichtlich, dass die pulsierende Strömung einen signifikanten Einfluss auf die Reinigungsfähigkeit in allen Zonen hat. Sogar in Zone 3 ist eine Verbesserung um 7 % erkennbar. Die pulsierende Strömung ist somit ein vielversprechender Ansatz zur Optimierung von Reinigungsprozessen.

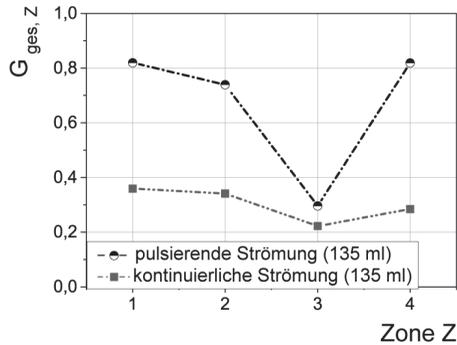


Abbildung 8-8: Vergleich kontinuierliche und pulsierende Strömung

Ein anderer Ansatz, um den Reinigungsgrad in Zone 3 zu erhöhen, wäre das Filtermedium umzudrehen, was bedeutet, die Partikel befänden sich jetzt auf der strömungszugewandten Filterseite. Diese Positionierung gewährleistet, dass der Pulsstrahl die Partikel in Zone 3 direkt erreichen kann, was einen höheren Reinigungsgrad zur Folge hätte. In Abbildung 8-9 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung dargestellt.

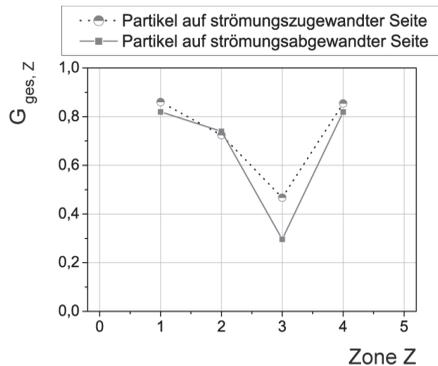


Abbildung 8-9: Vergleich Einbauposition des Filtermediums bei der pulsierenden Reinigung

Aus dem Diagramm geht hervor, dass ein Umdrehen des Filtermediums (Partikel befinden sich nun auf der strömungszugewandten Seite) eine Erhöhung des Reinigungsgrades gegenüber der ursprünglichen Position des Filtermediums in Zone 3 bewirkt. Der Reinigungsgrad verbessert sich in Zone 3 um 17%. In den anderen Zonen (1, 2 und 4) ist jedoch kein Unterschied im Reinigungsgrad des Gewebes erkennbar.

Eine weitere Erhöhung des Reinigungsgrades in Zone 3 könnte mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten oder mit geringeren Pulspausen erreicht werden, denn wie in Abschnitt 7.3.3 gezeigt, haben geringere Pulspausen einen höheren Reinigungsgrad als längere Pulspausen zur Folge.

8.3.2 Bewegung der Partikel während der Reinigung

In Abbildung 8-10 sind die Partikelbewegungen bei der kontinuierlichen Strömung (linkes Diagramm) und der pulsierenden Strömung (rechtes Diagramm) für das gesamte Gewebe dargestellt. Aufgetragen ist der Anteil bewegter Partikel (A_{Bewegung}) bzw. haftender Partikel (A_{Haftung}) über der Prozesszeit (t). Zusätzlich ist der Reinigungsgrad (G_{ges}) für den gesamten Bildausschnitt auf der Sekundärachse aufgetragen.

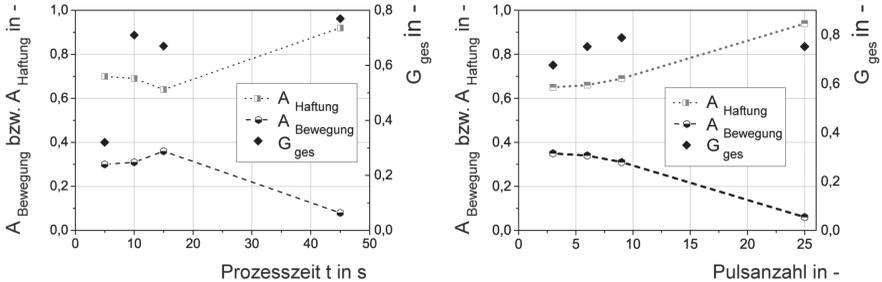
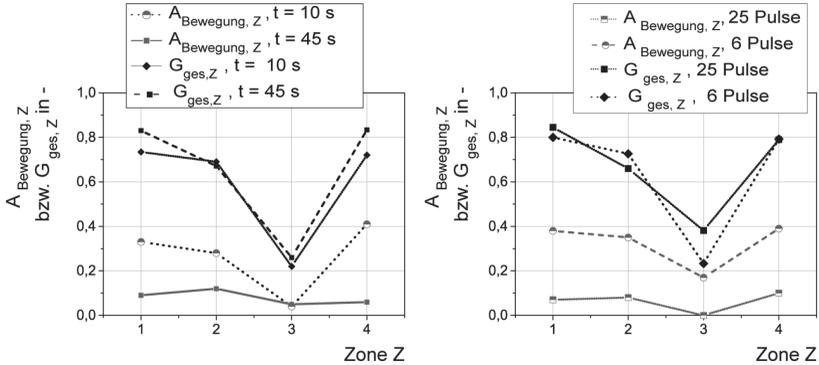


Abbildung 8-10: Partikelbewegung über gesamtes Filtermedium betrachtet, links: kontinuierliche Strömung, rechts: pulsierende Strömung

Für die kontinuierliche Strömung ist ersichtlich, dass bis zu einer Prozesszeit von 15 s der Anteil bewegter Partikel zunimmt. In diesem Bereich sind die Partikelbewegungen also noch nicht abgeschlossen. Es sind ebenfalls Änderungen im Reinigungsgrad zu erkennen. Bei einer Prozesszeit von 45 s dagegen nehmen die Partikelbewegungen ab. Es werden zu diesem Zeitpunkt kaum noch Partikel von der Oberfläche abgelöst (sei es durch direktes Ablösen oder Ablösen nach Partikelbewegung). Die Reinigung ist zu diesem Zeitpunkt schon fast abgeschlossen. Dieses Verhalten spiegelt sich auch im Reinigungsgrad wieder, der nur noch von 0,7 auf 0,78 ansteigt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass sich bis zu 36 % der zurückgebliebenen Partikel während der Reinigung bewegt haben. Die Partikelbewegungen bei der pulsierenden Strömung verhalten sich sehr ähnlich (Abbildung 8-10 rechts). Der Partikelbewegungsanteil nimmt jedoch schon nach drei Pulsen beginnend bei 35% langsam ab bis er nach 25 Pulsen einen Wert von 6% erreicht. Bei Betrachtung des Reinigungsgrades fällt auf,

dass ab 9 Pulsen die Reinigung schon fast abgeschlossen ist, da ab diesem Zeitpunkt der Reinigungsgrad nicht mehr ansteigt.

In Abbildung 8-11 sind die Ergebnisse der Partikelbewegungen in den einzelnen Zonen für beide Verfahren dargestellt.



**Abbildung 8-11: Partikelbewegungen in den unterschiedlichen Zonen:
links: kontinuierliche Reinigung, rechts: pulsierende Reinigung**

Aufgetragen ist jeweils der Anteil der bewegten Partikel ($A_{\text{Bewegung, Z}}$) über der jeweiligen Zone (Z) für Prozesszeiten von 10 und 45 s (kontinuierliche Strömung) und 6 und 25 Pulsen (pulsierende Strömung). Zusätzlich ist der Reinigungsgrad ($G_{\text{ges, Z}}$) für die beiden Prozesszeiten dargestellt. Aus dem linken Diagramm ist ersichtlich, dass für die kontinuierliche Strömung in den einzelnen Zonen eine Zeitabhängigkeit der Partikelbewegungen vorhanden ist. Je länger die Prozesszeit, desto geringer sind die Partikelbewegungen. Die Zeitabhängigkeit ist in Zone 1, 2 und 4 am Auffälligsten. In Zone 3 ist dagegen kein Einfluss der Prozesszeit auf die Partikelbewegung zu erkennen. Dieses Verhalten macht sich auch im Reinigungsgradverlauf bemerkbar. Denn der Reinigungsgrad nimmt mit steigender Prozesszeit in Zone 1 und 4 zu, während in Zone 3 kaum Unterschiede zu erkennen sind. Zudem fällt auf, dass die meisten Partikelbewegungen in Zone 1 und 4 zu finden sind, während in Zone 3 der geringste Anteil an Partikelbewegungen beobachtet wird. Das deutet darauf hin, dass in Zone 3 nur sehr wenig Partikel abgereinigt werden und die wenigen Partikel, die abgelöst werden, werden fast ohne Bewegung direkt von der Strömung abgetragen.

Für die pulsierende Strömung (rechtes Diagramm) sehen die Tendenzen ähnlich aus. Auch hier sind die Partikelbewegungen in Zone 1, 2 und 4 am größten und in Zone 3 ist der geringste Anteil an Partikelbewegungen vorzufinden. Je-

doch ist der nicht ganz so groß wie bei der kontinuierlichen Strömung. Außerdem ist hier eine Zeitabhängigkeit der Partikelbewegungen in allen Zonen zu erkennen. Bei einer Prozesszeit von 25 s (25 Pulse) bewegen sich mehr Partikel in Zone 3 als bei einer Prozesszeit von 6 s (6 Pulse).

Die Untersuchungen zur Partikelbewegungen haben gezeigt, dass sich ein erheblicher Anteil Partikel erst nach einer Bewegung von der Filteroberfläche ablöst. Ebenso war ersichtlich, dass die Partikelbewegung zeit- und zonenabhängig ist.

9 Gegenüberstellung der beiden Verfahren

Die vorangegangenen Kapitel beschäftigten sich mit den Mechanismen der kontinuierlichen und pulsierenden Reinigung. Jedoch gab es in keinem Kapitel einen direkten Vergleich der beiden Verfahren. Deshalb liegt der Fokus dieses Kapitels auf dem Vergleich des kontinuierlichen mit dem pulsierenden Verfahren. Die Versuche für die kontinuierliche Reinigung erfolgten in Kapitel 7.2 und die Versuche für die pulsierende Reinigung in Kapitel 7.3. Die für das kontinuierliche Verfahren eingesetzten Geschwindigkeiten entsprechen dabei industriell eingesetzten Rückspülgeschwindigkeiten.

Da die gereinigte Fläche bei beiden Verfahren unterschiedlich ist, wird für den hier durchgeführten Vergleich das flächenspezifische Reinigungsvolumen $V_{A, \text{spez}}$ verwendet. Es stellt das verbrauchte Reinigungsvolumen bezogen auf die gereinigte Fläche dar. Die gereinigte Fläche beträgt beim kontinuierlichen Verfahren $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ (Filterdurchmesser $d = 25 \text{ mm}$) und beim pulsierenden Verfahren $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, da die eingesetzte Düse maximal eine Fläche mit Durchmesser 5 mm reinigen kann. In Abbildung 9-1 ist der gemittelte Reinigungsgrad G über dem flächenspezifischen Volumen $V_{A, \text{spez}}$ dargestellt. Für die Untersuchungen wurde das PET-SK-22 verwendet. Die Geschwindigkeiten lagen für das kontinuierliche Verfahren bei 0,06 m/s und für das pulsierende zwischen 7,5 und 15 m/s. Beim pulsierenden Verfahren erfolgten alle Versuche mit einer Pulsdauer und einer Pulspause von 0,5 s, lediglich die Prozesszeit wurde variiert. Aus dem Diagramm geht hervor, dass für das kontinuierliche Verfahren 10 000 l/m² notwendig sind, um einen Reinigungsgrad von 75 % zu erreichen. Bei der pulsierenden Reinigung ist dagegen bei einer Pulsströmungsgeschwindigkeit von 11 m/s schon bei einem flächenspezifischen Volumen von 2 000 l/m² ein Reinigungsgrad von 92 % erreicht. Für eine Pulsströmungsgeschwindigkeit von 15 m/s wird nach dem gleichen spezifischen

Volumen (2000 l/m^2) sogar ein Reinigungsgrad von 96 % erzielt. Das Verfahren der pulsierenden Reinigung weist große Vorteile gegenüber dem kontinuierlichen Verfahren, sowohl in Bezug auf den Reinigungsgrad als auch auf den Reinigungsvolumenverbrauch, auf

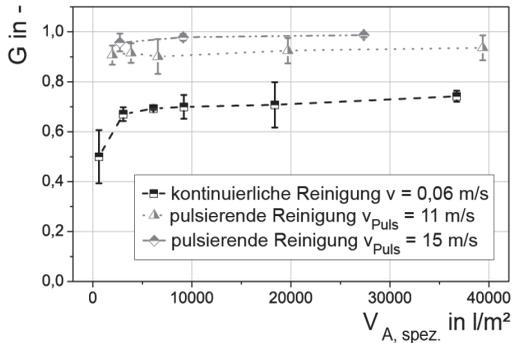


Abbildung 9-1: Vergleich kontinuierliches und pulsierendes Verfahren, Partikelgröße $10 \mu\text{m}$, $t_{\text{Puls}} = t_{\text{Pause}} = 0,5 \text{ s}$, Filter-Düse-Abstand: 17 mm

Bei der Gegenüberstellung der beiden Verfahren für die Reinigung von $5 \mu\text{m}$ Partikeln, sind die Ergebnisse ähnlich (Abbildung 9-2).

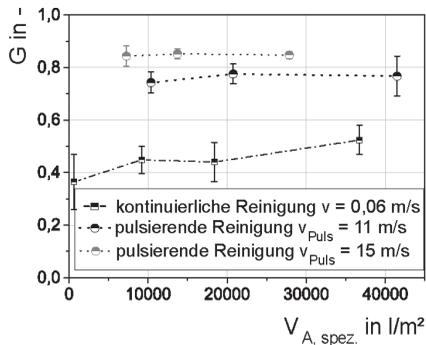


Abbildung 9-2: Vergleich kontinuierliches und pulsierendes Verfahren, Partikelgröße $5 \mu\text{m}$, $t_{\text{Puls}} = t_{\text{Pause}} = 0,5 \text{ s}$, Filter-Düse-Abstand: 17 mm

Aufgetragen ist auch hier der Reinigungsgrad über dem flächenspezifischen Reinigungsvolumen. Die kontinuierliche Reinigung erfolgte hier ebenfalls bei einer Anströmgeschwindigkeit von $0,06 \text{ m/s}$ und das pulsierende Verfahren bei Pulsströmungsgeschwindigkeiten von 11 und 15 m/s . Für die kontinuierliche Strömung ist in dem untersuchten Bereich ein maximaler Reinigungsgrad von

52% erreichbar, also um 23% geringer als bei den mit $10\ \mu\text{m}$ beladenen Geweben. Das für diesen Reinigungsgrad benötigte flächenspezifische Volumen beträgt $36\ 700\ \text{l/m}^2$. Beim pulsierenden Reinigungsverfahren nimmt der Reinigungsgrad ab einem flächenspezifischen Volumen von $10\ 000\ \text{l/m}^2$ schon einen konstanten Reinigungsgrad an. Der Reinigungsgrad liegt hierbei für $v_{Puls} = 11\ \text{m/s}$ bei 77% und bei $v_{Puls} = 15\ \text{m/s}$ bei 85%. Somit kann durch das pulsierende Verfahren eine Volumeneinsparung von $26\ 700\ \text{l/m}^2$ und eine Erhöhung des Reinigungsgrades um das 1,5 fache erreicht werden.

Da bei der pulsierenden Anlage, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam, eine sehr einfache Düse verwendet wurde (konstanter Durchmesser über gesamte Länge), besteht hier noch Potential für Optimierungen, was zu einer Vergrößerung der gereinigten Filterfläche und somit zu einer weiteren Minimierung des flächenspezifischen Volumens führen könnte.

10 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Gegenstand dieser Arbeit war die Untersuchung der Reinigung von polymeren Filtergeweben. Essentieller Bestandteil war dabei die Untersuchung verschiedener Verunreinigungsarten (lösliche und partikuläre Verunreinigung) und die Untersuchung verschiedener Verfahren zur Reinigung der Filtermedien (pulsierende und kontinuierliche Strömung). Dabei stand unter anderem auch die Erarbeitung von Kennzahlen und deren Zusammenspiel untereinander im Vordergrund, mit dessen Hilfe das Reinigungsergebnis der Filtermedien unterschiedlicher Geometrie vorhergesagt werden kann.

Im Folgenden sind die erreichten Ziele und ein weiterführender Ausblick dargestellt:

- i) *Aufklärung der Mechanismen bei der kontinuierlichen Reinigung von Filtermedien beladen mit einer löslichen Verunreinigung und Vorhersage des Reinigungsergebnisses über eine Dimensionsanalyse*

Im Rahmen dieser Arbeit war es möglich, die Mechanismen bei der Reinigung einer löslichen Verunreinigung mithilfe einer kontinuierlichen Strömung aufzuklären. Dabei erfolgte die Kontaminierung mithilfe einer Kontaminierungseinheit, mit der ein dünner Kuchen auf dem Filtermedium gebildet werden konnte. Die Reinigungskinetik wies vier verschiedene Phasen auf, die im Folgenden beschrieben sind: In der ersten Phase steht der Kuchenabwurf im Vordergrund, das bedeutet innerhalb dieser Phase wird der Kuchen fast vollständig ausgetragen. Sie ist gekennzeichnet durch einen starken Abfall der Reinigungsrate. Die zweite Phase weist einen geringeren Abfall der Reinigungsrate als in Phase 1 auf, das rührt daher, dass hier die restlichen Kuchenbruchstücke vom Filtermedium abgeworfen werden. Der dominierende Faktor in Phase 1 und 2 ist der konvektive Stoffübergang. In Phase 3 ist dagegen eine konstante Reinigungsra-

te erkennbar. Hier liegt nur noch ein dünner Film gelöstes Riboflavin um die Fasern und der Stoffübergang findet nur zwischen Verunreinigung und Reinigungsfluid statt. Es konnte gezeigt werden, dass die Höhe der konstanten Reinigungsrate ein Maß für die Reinigungsfähigkeit ist. Des Weiteren ist sie von der Gewebegeometrie und der Strömungsgeschwindigkeit des Reinigungsfluides abhängig. Bei größeren Geschwindigkeiten weist die konstante Reinigungsrate ein höheres Niveau. Ebenso konnte gezeigt werden, dass je mehr Umschlingungen vorhanden sind und je kürzer die Länge der Umschlingungen (l_d) ist, desto geringer ist die konstante Reinigungsrate und desto schlechter ist die Reinigungsfähigkeit. Wenn die gleichmäßige Schicht Riboflavin ausgetragen ist, nimmt die Reinigungsrate immer mehr ab, bis kein Riboflavin mehr vorhanden ist (Phase 4). Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte ein Zusammenhang zwischen dem Abfall der Reinigungsrate und der Oberflächenbeschaffenheit festgestellt werden. Eine glattere Oberfläche führt daher zu einem stärkeren Abfall der Reinigungsrate (größere negative Steigung) in Phase 4.

Ferner konnten Kennzahlen erarbeitet werden, die die Einflussfaktoren der Reinigung beinhalten. Hierbei wurden Kennzahlen aus dem Bereich des Stoffübergangs (Sherwood-, Reynolds- und Schmidt-Zahl) verwendet. Zusätzlich zu den Kennzahlen des Stoffübergangs wurde eine weitere Kennzahl, die Geometrie-Zahl C , die die geometrischen Verhältnisse des Filtermediums beinhaltet, erarbeitet. Mithilfe der experimentellen Daten konnte der Zusammenhang der Kennzahlen untereinander bestimmt werden. Er stellt die Sherwood-Zahl in Abhängigkeit der Reynolds-, Schmidt- und Geometrie-Zahl dar. Durch Einsetzen der Strömungseigenschaften (kinematische Viskosität des Fluides ν_{Fluid} , Pulsströmungsgeschwindigkeit v_{Puls}), der Eigenschaften der Verunreinigung (Diffusionskoeffizient D) und der Geometrie des Filtergewebes (Geometriezahl C) konnte die Sherwood-Zahl berechnet und somit das Reinigungsergebnis vorhergesagt werden. Der Vergleich der berechneten mit den experimentell bestimmten Sherwood-Zahlen lieferte dabei gute Übereinstimmungen. Für eine weiterführende Arbeit bietet sich an, durch weitere Versuche die theoretische Sherwood-Zahl noch exakter zu bestimmen. Die Vorhersage des Reinigungsergebnisses ermöglicht es Anwendern von Filtrationsanlagen, im Vorfeld das Reinigungsergebnis und den benötigten Zeit- und Kostenaufwand abzuschätzen. Ebenso wäre es sinnvoll, zu untersuchen, ob dieses Modell auch auf andere nicht gewebte Filtermedien anwendbar ist. Dabei müsste für die Filtergeometrie eine andere charakteristische Länge entwickelt werden.

- ii) *Das Verfahren mit pulsierender Strömung führt zu einer Verbesserung des Reinigungsgrades gegenüber dem rein kontinuierlichen Verfahren und eine Vorhersage des Reinigungsergebnisses ist möglich.*

Bei der Reinigung einer partikulären Verunreinigung wurden zwei Verfahren untersucht: die Reinigung mithilfe einer kontinuierlichen Strömung, die schon bei der löslichen Verunreinigung eingesetzt wurde, und die Reinigung mithilfe einer pulsierenden Strömung. Als Verunreinigung dienten fluoreszierende Melaminharz-Partikel. Die Reinigungsbeurteilung erfolgte über ein direktes Auszählen der Partikel auf einem definierten Gewebeausschnitt. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Reinigung zeigten neben einer Geschwindigkeits- auch eine Zeitabhängigkeit. Der Geschwindigkeitseinfluss lässt sich durch die Kräfte, die auf die Partikel wirken, erklären. Größere Strömungsgeschwindigkeiten bewirken höhere Wandschubspannungen. Überraschend war jedoch, dass bei einer partikulären Verschmutzung, die nicht in Wasser löslich ist, auch eine Zeitabhängigkeit erkennbar war. Erst nach einer bestimmten Prozesszeit nähert sich der Reinigungsgrad einem Grenzwert, ab dem sich keine Partikel mehr von der Oberfläche ablösen. Da die Ablösung der Partikel von gewebten Strukturen sehr komplex ist, erfolgte die Untersuchung der Ablösemechanismen in einem separaten Kapitel. Ebenfalls konnte bei der Reinigung der partikulären Verunreinigung ein Temperatureinfluss beobachtet werden. Je höher die Temperatur, desto schneller läuft die Reinigungskinetik ab (zumindest in dem untersuchten Temperaturbereich von 20 – 80°C). Bei genauerer Betrachtung ist dieser Einfluss jedoch nicht auf die Temperatur des Reinigungsfluides zurückzuführen, sondern eher auf die Strömungsart. Denn bei Berechnung der Reynolds-Zahlen im angeströmten Rohr zeigte sich, dass bei einem Reinigungsfluid von 80°C eine Reynolds-Zahl von 4360 erreicht wird, während die Reynolds-Zahl bei 20°C nur einen Wert von 1570 annimmt. Versuche bei 20°C mit einer Reynolds-Zahl von 4320 (fast gleiche Reynolds-Zahl wie bei 80°C, Strömungsgeschwindigkeit lag bei 0,17 m/s) bestätigte die Annahme, dass der entscheidende Faktor nicht die Temperatur, sondern die Strömungsart ist. Die beiden Kinetik-Kurven lagen nämlich direkt übereinander. Wodurch die Strömungsart dann letztendlich in einem industriellen Prozess verändert wird (durch Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit oder durch Erhöhen der Temperatur), muss für den jeweiligen Fall gesamtwirtschaftlich betrachtet werden.

Ferner zeigten weitere Untersuchungen, dass die Partikelgröße einen weiteren Einflussfaktor darstellt. Größere Verunreinigungen lassen sich – wie zu erwarten war – leichter durch die Strömung ablösen als feinere Verunreinigungen. Bei

den untersuchten Parametern ($v = 0,06$ m/s, Prozesszeiten zwischen 10 und 600 s) war ein Unterschied im Reinigungsgrad von 32% Prozent zu erkennen. Der Grund für die bessere Ablösung der großen Partikel ist, dass die Adhäsionskräfte (Van-der-Waals, elektrostatische Kräfte) proportional zum Partikeldurchmesser ansteigen, während die trennenden Kräfte (Auftriebskräfte, Widerstandskräfte und das Moment der Oberflächenspannung, das auf die Angriffsfläche des Partikels wirkt) proportional zum Partikeldurchmesser im Quadrat ansteigen [65].

Der Vergleich der Filtermedien sollte einen Zusammenhang zwischen charakteristischer Länge l_{Gewebe} und Reinigungsgrad G liefern. Jedoch war der Einfluss auf den Reinigungsgrad sehr gering, was an den ähnlichen Filtergeometrien (charakteristische Längen lagen sehr nahe beieinander) lag. Es zeigt sich jedoch, dass mit steigender charakteristischer Länge auch der Reinigungsgrad zunimmt. Zusammenfassend haben die Untersuchungen zur kontinuierlichen Reinigung gezeigt, dass für die rein kontinuierliche Reinigung bei industrierelevanten Strömungsgeschwindigkeiten große Mengen an Reinigungsfluid notwendig sind, um einen akzeptablen Reinigungsgrad zu erzielen. Deshalb ist es unumgänglich nach alternativen Verfahren Ausschau zu halten.

Ein alternatives Verfahren stellt die Reinigung mit pulsierender Strömung dar. Der Aufbau der Anlage ist gegenüber dem kontinuierlichen Verfahren etwas abgeändert. Dabei sitzt eine Düse mit einem Querschnitt von 3,1 mm 17 mm vor dem Filtermedium. Die Düse soll gezielt eine definierte Fläche des Gewebes reinigen. Die Pulsation wird mithilfe eines Magnetventils realisiert, das mit der Düse verbunden ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Einflussparameter Pulsdauer, Pulspause, Prozesszeit, Pulsströmungsgeschwindigkeit, pH-Wert des Reinigungsfluides und Abstand zwischen Düse und Filtermedium untersucht. Interessant war des Weiteren herauszufinden, wie homogen die Reinigung entlang der Filterfläche ist und inwieweit die pulsierende gegenüber der kontinuierlichen Strömung vorteilhaft ist. Es zeigte sich, dass die Pulsdauer keinen Einfluss auf den Reinigungsgrad hat, aber die Pulspause das Ergebnis signifikant beeinflusst. Je geringer die Pulspause, also je schneller die Pulse nacheinander folgen, desto besser ist das Reinigungsergebnis. Ausschlaggebend ist hierbei die permanente Beschleunigung des Fluides. Die Prozesszeit hat auch bei der pulsierenden Strömung einen erheblichen Einfluss. So steigt der Reinigungsgrad mit der Durchströmungsdauer zunächst an und nähert sich erst nach einiger Zeit einem konstanten Wert.

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren stellt die Pulsströmungsgeschwindigkeit dar. Je höher die Pulsströmungsgeschwindigkeit ist, desto besser ist das Reinigungsergebnis, da hierbei die Kräfte aus der Strömung größer als die haftenden Kräfte sind. Die Untersuchungen zur Homogenität der Reinigung entlang der Filterfläche zeigten eine Abhängigkeit vom Filter-Düse-Abstand. Je näher die Düse vor dem Filtermedium platziert ist, desto kleiner ist die homogen gereinigte Fläche. Das liegt vor allem an der Aufweitung des Strahls der pulsierenden Strömung. Je weiter die Düse vom Gewebe entfernt ist, desto größer ist die Fläche, die vom Flüssigkeitsstrahl erreicht wird. Jedoch darf der Abstand nicht zu groß gewählt werden, da die Strömung sonst von dem umgebenden Fluid in der Anlage abgebremst wird. Interessante Zusammenhänge lieferten ebenfalls die Untersuchungen mit Reinigungsfluiden unterschiedlicher pH-Werte. Die Ergebnisse konnten sehr gut mit dem Zetapotential der jeweiligen Filtermaterialien und der partikulären Verunreinigung in Zusammenhang gebracht werden. Lagen die pH-Werte in dem Bereich, in dem das Zetapotential der Partikel dem des Materials entgegengerichtet war, war der Reinigungsgrad recht gering, da die beiden Materialien sich anziehen und es somit zu einer Erhöhung der Haftkraft kam. Lagen die pH-Werte dagegen in dem Bereich, in dem die Zetapotentiale beider Materialien gleiche Vorzeichen besaßen (sich also abstoßen), stieg der Reinigungsgrad an. Bei einem Abstand von Filter und Düse von 5 cm konnte bei einem pH-Wert von 11 ein um 40% höherer Reinigungsgrad erreicht werden, als bei der Reinigung mit reinem Wasser. Der reinigungsentscheidende Faktor ist hierbei also die Wechselwirkung zwischen Partikel und Oberfläche.

Das Ziel dieser Parametervariationen war in erster Linie, die Einflussfaktoren bei einer kontinuierlichen und pulsierenden Reinigung genauer zu verstehen. In einem weiteren Schritt wurde versucht das Zusammenspiel der physikalischen Größen zu erfassen. Dabei wurden dimensionslose Kennzahlen erarbeitet, die die Einflussfaktoren beinhalten: Die Reynolds-Zahl beschreibt die Eigenschaften der Strömung, der Geometriefaktor C , der schon bei der Reinigung des Riboflavins eingeführt wurde, den Geometrie-Einfluss des Gewebes, der Faktor N_{Pause} bzw. $N_{Prozess}$ die Abhängigkeit des Reinigungsergebnisses von der Pulspause bzw. Prozesszeit und der Faktor V_p , berücksichtigt den Einfluss der Partikelgröße. Mithilfe der experimentellen Daten, konnte der Reinigungsgrad G durch Wahl der optimalen Exponenten in Abhängigkeit von N_{Pause} , V_p , Re und C dargestellt werden. Somit kann eine Vorhersage des Reinigungsergebnisses erfolgen. Hier bietet es sich für eine Folgearbeit an, den Geltungsbereich durch weitere Versuche zu vergrößern. Ebenso wäre es von großem Vorteil, die pulsierende Filterreinigung an einem industriellen Filterapparat zu erproben. Dabei

könnten weiterhin unterschiedliche Düsenarten untersucht und die optimalste ausgewählt werden.

iii) Schwachstellen bei der Reinigung mit pulsierender und kontinuierlicher Strömung und Untersuchung der Ablösemechanismen bei der Reinigung

Da sowohl die Reinigung mit kontinuierlicher als auch mit pulsierender Strömung eine Zeitabhängigkeit aufwies, ist es von Interesse die genauen Mechanismen bei der Ablösung der Partikel vom Filtergewebe zu untersuchen. Bei den Untersuchungen wurde zwischen direkter Ablösung und der Ablösung der Partikel nach einer Bewegung auf dem Gewebe unterschieden. Es war jedoch nicht möglich, aufgrund der Offline- Auswertung der Filtergewebe, herauszufinden, in welche Richtung sich die Partikel bewegt und welche Distanz sie während der Reinigung zurückgelegt haben. Die Untersuchungen zeigten, dass Partikelbewegungen bei der Reinigung eine große Rolle spielen und Ursache für die zeitabhängige Reinigung einer partikulären Verunreinigung ist. Da die Partikelbewegungen ortsabhängig sind, erfolgte eine Einteilung des Gewebes in vier verschiedene Bereiche. Es hat sich gezeigt, dass der Bereich auf dem Schussfaden, der über dem Kettfaden liegt, bei beiden Verfahren die geringsten Partikelbewegungen aufweist. Anhand einer detaillierten Betrachtung der einzelnen Bereiche konnten die kritischen Reinigungsstellen des Gewebes identifiziert und quantifiziert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die höchste Stelle auf dem Schussfaden die schlechteste Reinigungsfähigkeit aufweist und die beste Reinigungsfähigkeit in Zone 1 und 4 zu finden ist. Eine Verbesserung der Reinigungsfähigkeit kann durch Umdrehen des Filtergewebes erreicht werden, so dass sich die Partikel auf der strömungszugewandten Seite befinden.

Bei den bisherigen Untersuchungen war es jedoch aufgrund der indirekten Betrachtungsweise nicht möglich, die genaue Bewegung (Länge und Richtung der Bewegung) der Partikel zu detektieren. Unter Kenntnis der genauen Strömungsverhältnisse, die auf das jeweilige Partikel an seiner jeweiligen Position wirken, wäre für die Bewegungsart der Partikel eine Vorhersage möglich.

iv) Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeit beider Verfahren hinsichtlich Reinigungs-fluidverbrauch

In einem letzten Schritt konnte eine Gegenüberstellung der Verfahren mit kontinuierlicher und pulsierender Reinigung erfolgen. Dazu wurde das rein kontinuierliche Verfahren mit dem pulsierenden Verfahren hinsichtlich des flächenspezifischen Reinigungsfluidverbrauchs verglichen. Das pulsierende Verfahren ist

hinsichtlich des Reinigungsfluidverbrauchs und des dabei erzielten Reinigungsgrades viel wirtschaftlicher. Es erreicht ein bis zu 20% besseren Reinigungsgrad bei einem 20-fach geringeren spezifischen Volumen. Da bei der pulsierenden Anlage, eine sehr einfache Düse verwendet wurde (konstanter Durchmesser über gesamte Länge), besteht hier noch Potential für Optimierungen, was zu einer Vergrößerung der gereinigten Filterfläche und somit zu einer weiteren Minimierung des flächenspezifischen Volumens führen könnte.

A Literaturverzeichnis

- [1] Hauser, G., *Vorraussetzung erfüllt?* Pharma and Food, 2000, 3.
- [2] Stahl, S., *Zum Reinigungsverhalten von Filtergeweben auf diskontinuierlichen Filterzentrifugen*. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik. 2013, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [3] VDI, *VDI-Wärmeatlas*. 2006, Springer-Verlag Heidelberg.
- [4] Reiff, F., *Reinigungs-und Desinfektionsmittel im Lebensmittelbetrieb*. Handbuch der Lebensmittelchemie, 1970, 9.
- [5] Reinhardt, A., *Reinigungs-und Desinfektionsverfahren*. Getreide, Mehl, Brot, 27: p. 381-385.
- [6] Schmidt, U. und Leistner, L., *Reinigung und Desinfektion in der Fleischwirtschaft*. Desinfektion in der Tierhaltung, Fleischwirtschaft und Milchwirtschaft, Enke Verlag, Stuttgart, 1981.
- [7] Flückiger, E., *Grundzüge der Reinigung und Qualitätsmilcherzeugung in Melkmaschinenbetrieben*. Schweizerische Milchzeitung, 1964, 90: p. 3-16.
- [8] Reuter, H., *Reinigen und Desinfizieren im Molkereibetrieb. Stand des Wissens und der Technik*. Chemie Ingenieur Technik, 1983, 55(4): p. 293-301.
- [9] Matsumoto, K., Katsuyama, S. und Ohya, H., *Separation of yeast by cross-flow filtration with backwashing*. Journal of Fermentation Technology, 1987, 65(1): p. 77-83.

- [10] Daufin, G., Merin, U., Labbé, J.P., Quémerais, A. und Kerhervé, F.L., *Cleaning of inorganic membranes after whey and milk ultrafiltration*. Biotechnology and Bioengineering, 1991, 38(1): p. 82-89.
- [11] Rodgers, V.G.J. und Sparks, R.E., *Reduction of membrane fouling in the ultrafiltration of binary protein mixtures*. AIChE Journal, 1991, 37(10): p. 1517-1528.
- [12] Bowen, W.R., Calvo, J.I. und Hernández, A., *Steps of membrane blocking in flux decline during protein microfiltration*. Journal of Membrane Science, 1995, 101(1-2): p. 153-165.
- [13] Iritani, E., Mukai, Y., Tanaka, Y. und Murase, T., *Flux decline behavior in dead-end microfiltration of protein solutions*. Journal of Membrane Science, 1995, 103(1-2): p. 181-191.
- [14] Xu, Y., Dodds, J. und Leclerc, D., *Optimization of a discontinuous microfiltration-backwash process*. The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, 1995, 57(3): p. 247-251.
- [15] Jiraratananon, R. und Chanachai, A., *A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice*. Journal of Membrane Science, 1996, 111(1): p. 39-48.
- [16] Muñoz-Aguado, M.J., Wiley, D.E. und Fane, A.G., *Enzymatic and detergent cleaning of a polysulfone ultrafiltration membrane fouled with BSA and whey*. Journal of Membrane Science, 1996, 117(1-2): p. 175-187.
- [17] Gan, Q., Howell, J.A., Field, R.W., England, R., Bird, M.R. und McKechnie, M.T., *Synergetic cleaning procedure for a ceramic membrane fouled by beer microfiltration*. Journal of Membrane Science, 1999, 155(2): p. 277-289.
- [18] Czekaj, P., López, F. und Güell, C., *Membrane fouling during microfiltration of fermented beverages*. Journal of Membrane Science, 2000, 166(2): p. 199-212.
- [19] Toraj, M., *Chemical cleaning of a polyamide membrane*. Desalination, 2001, 139(1-3): p. 381.
- [20] Argüello, M.A., Álvarez, S., Riera, F.A. und Álvarez, R., *Enzymatic cleaning of inorganic ultrafiltration membranes used for whey protein*

- fractionation*. Journal of Membrane Science, 2003, 216(1–2): p. 121-134.
- [21] Lim, A.L. und Bai, R., *Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater*. Journal of Membrane Science, 2003, 216(1–2): p. 279-290.
- [22] Weis, A., Bird, M.R. und Nyström, M., *The chemical cleaning of polymeric UF membranes fouled with spent sulphite liquor over multiple operational cycles*. Journal of Membrane Science, 2003, 216(1–2): p. 67-79.
- [23] Madaeni, S.S. und Mansourpanah, Y., *Chemical cleaning of reverse osmosis membranes fouled by whey*. Desalination, 2004, 161(1): p. 13-24.
- [24] Kuzmenko, D., Arkhangelsky, E., Belfer, S., Freger, V. und Gitis, V., *Chemical cleaning of UF membranes fouled by BSA*. Desalination, 2005, 179(1–3): p. 323-333.
- [25] Kazemimoghadam, M. und Mohammadi, T., *Chemical cleaning of ultrafiltration membranes in the milk industry*. Desalination, 2007, 204(1–3): p. 213-218.
- [26] Liang, H., Gong, W., Chen, J. und Li, G., *Cleaning of fouled ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment*. Desalination, 2008, 220(1–3): p. 267-272.
- [27] Hauser, G., ed. *Hygienegerechte Apparate und Anlagen in der Lebensmittel-, Pharma- und Kosmetikindustrie*. Vol. 1. 2008, WILEY-VCH-Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim.
- [28] Hauser, G., ed. *Hygienische Produktionstechnologie*. Vol. 1. 2008, WILEY-VCH-Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim.
- [29] EHEDG, *Doc 7: A method for the assesment of bacteria tightness of food processing equipment*. 1993: Brüssel.
- [30] EHEDG, *Doc 2: A method for assessing the in-place cleanability of food processing equipment*. 2000: Brüssel.
- [31] EHEDG, *Doc 5: A method for the assesment of in-line steam sterilisability of food processing equipment*. 1993: Brüssel.

- [32] VDMA, *Merkblatt: Riboflavintest für keimarme oder sterile Verfahrenstechniken-Fluoreszenztest zur Prüfung der Reinigbarkeit*. 2007: Frankfurt.
- [33] Stahl, S., Siggelkow, S. und Nirschl, H., *A microbiological test method to determine the cleanability of filter media in solid-liquid-separation applications*. Engineering in Life Sciences, 2007, 7(2): p. 136-142.
- [34] Beck, U., Bobe, U., Gamer, N., Reiners, G. und Sommer, K., *Reinigung realer Oberflächen*. Chemie Ingenieur Technik, 2005, 77(12): p. 1942-1946.
- [35] Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M. und Wilson, D.I., *Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows*. Journal of Food Engineering, 2000, 46(3): p. 199-209.
- [36] Graßhoff, A., *Modellversuche zur Ablösung fest verkrusteter Milchbeläge von Erhitzerplatten im Zirkulationsverfahren*. Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte, 1991, 35(4): p. 493-519.
- [37] Graßhoff, A. und Reuter, H., *Untersuchungen zum Reinigungsverhalten zylindrischer Toträume*. Chemie Ingenieur Technik, 1983, 55(5): p. 406-407.
- [38] Hofmann, J., *Stoffübergang bei der Reinigung als Qualifizierungsmethode der Reinigbarkeit*. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt 2007, Dissertation, Technische Universität München.
- [39] Welchner, K., *Zum Ausspülverhalten hochviskoser Produkte aus Rohrleitungen-Wechselwirkungen zwischen Produkt und Spülfluid*. Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft 1993, Dissertation, Technische Universität München.
- [40] Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M. und Wilson, D.I., *Cleaning-in-place of whey protein fouling deposits: mechanisms controlling cleaning*. Food and Bioproducts Processing, 1999, 77(2): p. 127-136.
- [41] Xin, H., Chen, X.D. und Özkan, N., *Whey protein-based gel as a model material for studying initial cleaning mechanisms of milk fouling*. Journal of Food Science, 2002, 67(7): p. 2702-2711.

- [42] Bobe, U., *Die Reinigbarkeit technischer Oberflächen im immmergierten System*. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. 2008, Dissertation, Technische Universität München.
- [43] Weigl, B., *Trennkkräfte zwischen Mikroorganismen, Partikeln und Oberflächen*. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. 2003, Dissertation, Technische Universität München.
- [44] Bénézech, T., Lelièvre, C., Membré, J.M., Viet, A.F. und Faille, C., *A new test method for in-place cleanability of food processing equipment*. Journal of Food Engineering, 2002, 54(1): p. 7-15.
- [45] Blel, W., Legentilhomme, P., Legrand, J., Bénézech, T. und Gentil-Lelièvre, C.L., *Hygienic design: Effect of hydrodynamics on the cleanability of a food processing line*. AIChE Journal, 2008, 54(10): p. 2553-2566.
- [46] Bergman, B.-O. und Tragardh, C., *An approach to study and model the hydrodynamic cleaning effect* Journal of Food Process Engineering, 1990, 13(2): p. 135-154.
- [47] Edwards, M. und Wilkinson, W., *Review of potential applications of pulsating flow in pipes*. Trans. Inst. Chem. Eng, 1971, 49(2): p. 85-94.
- [48] Förster, M., Augustin, W. und Bohnet, M., *Influence of the adhesion force crystal/heat exchanger surface on fouling mitigation*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1999, 38(4-6): p. 449-461.
- [49] Bode, K., Hooper, R.J., Paterson, W. und Wilson, D.I., *Pulsed Flow cleaning of Whey protein fouling layers*. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(3): p. 202-209.
- [50] Augustin, W., Fuchs, T., Föste, H., Schöler, M., Majschak, J.-P. und Scholl, S., *Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing*. Food and Bioproducts Processing 2010, 88: p. 384-391.
- [51] Blel, W., Le Gentil-Lelièvre, C., Bénézech, T., Legrand, J. und Legentilhomme, P., *Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 1: Experimental analysis of wall shear stress in a cylindrical pipe*. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): p. 422-432.

- [52] Blel, W., Legentilhomme, P., Bénézec, T., Legrand, J. und Le Gentil-Lelièvre, C., *Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 2: Effects on cleaning efficiency*. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): p. 433-440.
- [53] Rubin, G., *Widerstands- und Auftriebsbeiwert von ruhenden kugelförmigen Partikeln in stationären, wandnahen laminaren Grenzschichten*. Institute of Mechanical Process Engineering and Mechanics. 1977, Dissertation, University of Karlsruhe.
- [54] Masironi, L.A. und Fish, B.R. *Direct observation of particle reentrainment from surfaces*. in *Surface contamination*. 1964. Gatlinburg, Tennessee: Pergamon Press, Oxford.
- [55] Sehmel, G.A., *Particle and gas dry deposition: A review*. Atmospheric Environment (1967), 1980, 14(9): p. 983-1011.
- [56] Corn, M. und Stein, F., *Re-entrainment of particles from a plane surface*. American Industrial Hygiene Association Journal, 1965, 26(4): p. 325-336.
- [57] Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A. und Runstadler, P.W., *The structure of turbulent boundary layers*. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(04): p. 741-773.
- [58] Cleaver, J.W. und Yates, B., *Mechanism of detachment of colloidal particles from a flat substrate in a turbulent flow*. Journal of Colloid and Interface Science, 1973, 44(3): p. 464-474.
- [59] Hubbe, M.A., *Theory of detachment of colloidal particles from flat surfaces exposed to flow*. Colloids and Surfaces, 1984, 12(0): p. 151-178.
- [60] Reeks, M.W., Reed, J. und Hall, D., *On the resuspension of small particles by a turbulent flow* Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21(4).
- [61] Wen, H.Y. und Kasper, G., *On the kinetics of particle reentrainment from surfaces*. Journal of Aerosol Science, 1989, 20(4): p. 483-498.
- [62] Wang, H.-C., *Effects of inceptive motion on particle detachment from surfaces*. Aerosol Science and Technology, 1990, 13(3): p. 386-393.

- [63] Soltani, M. und Ahmadi, G., *On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8(7): p. 763-785.
- [64] Ibrahim, A.H., Dunn, P.F. und Brach, R.M., *Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: controlled experiments and modeling*. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(6): p. 765-782.
- [65] Burdick, G.M., Berman, N.S. und Beaudoin, S.P., *Hydrodynamic particle removal from surfaces*. Thin Solid Films, 2005, 488(1-2): p. 116-123.
- [66] Stahl, S., Leipert, C. und Nirschl, H., *The cleanability of particle loaded woven filter media in solid-liquid separation*. Separation and Purification Technology, 2013, 110(0): p. 196-201.
- [67] Rodgers, V.G.J. und Sparks, R.E., *Effect of transmembrane pressure pulsing on concentration polarization*. Journal of Membrane Science, 1992, 68(1-2): p. 149-168.
- [68] Redkar, S.G. und Davis, R.H., *Cross-flow microfiltration with high-frequency reverse filtration*. AIChE Journal, 1995, 41(3): p. 501-508.
- [69] Parnham, C.S. und Davis, R.H., *Protein recovery from bacterial cell debris using crossflow microfiltration with backpulsing*. Journal of Membrane Science, 1996, 118(2): p. 259-268.
- [70] Kuberkar, V., Czekaj, P. und Davis, R., *Flux enhancement for membrane filtration of bacterial suspensions using high-frequency backpulsing*. Biotechnology and Bioengineering, 1998, 60(1): p. 77-87.
- [71] Ramirez, J.A. und Davis, R.H., *Application of cross-flow microfiltration with rapid backpulsing to wastewater treatment*. Journal of Hazardous Materials, 1998, 63(2-3): p. 179-197.
- [72] Ma, H., Bowman, C.N. und Davis, R.H., *Membrane fouling reduction by backpulsing and surface modification*. Journal of Membrane Science, 2000, 173(2): p. 191-200.
- [73] Sondhi, R., Lin, Y.S. und Alvarez, F., *Crossflow filtration of chromium hydroxide suspension by ceramic membranes: fouling and its minimization by backpulsing*. Journal of Membrane Science, 2000, 174(1): p. 111-122.

- [74] Sondhi, R., Lin, Y.S., Zhu, W. und Alvarez, F., *Cross-Flow Filtration of Synthetic Electroplating Wastewater by Ceramic Membranes Using High Frequency Backpulsing*. Environmental Technology, 2000, 21(6): p. 699 - 712.
- [75] Redkar, S., Kuberkar, V. und Davis, R.H., *Modeling of concentration polarization and depolarization with high-frequency backpulsing*. Journal of Membrane Science, 1996, 121(2): p. 229-242.
- [76] Mores, W.D., Bowman, C.N. und Davis, R.H., *Theoretical and experimental flux maximization by optimization of backpulsing*. Journal of Membrane Science, 2000, 165(2): p. 225-236.
- [77] Héran, M. und Elmaleh, S., *Prediction of cross-flow microfiltration through an inorganic tubular membrane with high-frequency retrofiltration*. Chemical Engineering Science, 2001, 56(10): p. 3075-3082.
- [78] Stahl, S., Ruland, J. und Nirschl, H., *Prozessstrategien zur optimalen Reinigungsfähigkeit am Beispiel des Titus-Zentrifugentrockners TZT 400*. Chemie Ingenieur Technik, 2007, 79(11): p. 1959-1968.
- [79] Hegnauer, B. *Diskontinuierliche Filterzentrifugen*. in *FFT-Kurs*. 2013. Karlsruhe.
- [80] BHS-Sonthofen-GmbH, *Taktbandfilter BF*, 2012, Informationsbroschüre
- [81] *Kantenspaltfilter Typ KSF*, 2006, Informationsbroschüre
- [82] Fuhr-GmbH, *Typ KSF-240 K/L Selbstreinigender Kantenspaltfilter*, Informationsbroschüre
- [83] Berndt, R., *Apparateprinzipien für die Klärfiltration von Betriebshilfsmedien*. Filtrieren und Separieren, 2013, 27(4): p. 5.
- [84] Rieger, H. und Piesche, M., *CFD-Simulation zur Berechnung der durch Gewebestrukturen induzierten Strömungsfelder mithilfe der Immersed-boundary-Methode*. Chemie Ingenieur Technik, 2013, 85(12): p. 1921-1927.
- [85] Steinhaus-GmbH, *Präzisions-Filterrohre*, 2007, Informationsbroschüre
- [86] Hamaker, H.C., *The London—van der Waals attraction between spherical particles*. Physica, 1937, 4(10): p. 1058-1072.

- [87] Israelachvili, J.N., *Intermolecular and surface forces*. 2011, Academic Press: San Diego. p. 1-449.
- [88] Owens, D.K. und Wendt, R.C., *Estimation of the surface free energy of polymers*. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8): p. 1741-1747.
- [89] Rabel, W., *Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren*. Farbe und Lacke, 1971, 77(10): p. 997-1006.
- [90] Lifshitz, E.M., *The Theory of molecular attractive forces between solids*. Soviet Phys. JETP, 1956, 2: p. 73-83.
- [91] Gouy, G., *On the Formation of Electrical Charges at the Surface of an Electrolyte*. J. physique, 1910, 9: p. 457-469.
- [92] Gouy, G., *Interferences with large path differences*. Ann. Phys. Paris, 1917, 7: p. 88-92.
- [93] Chapman, D.L., *L1. A contribution to the theory of electrocapillarity*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1913, 25(148): p. 475-481.
- [94] Helmholtz, H.v., *Studien über elektrische Grenzschichten*. Annalen der Physik, 1879, 243(7): p. 337-382.
- [95] Stern-Hamburg, H.O., *Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht*. S. f. Electrochemie, 1924, 30: p. 508.
- [96] Riddick, T.M., *Control of colloidal stability through zeta potential*. Vol. 1. 1968, Winnewood, Pennsylvania: Livingston Publishing Company.
- [97] Herwig, H., *Strömungsmechanik: Einführung in die Physik von technischen Strömungen*. 2008: Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- [98] Schlichting, H., Krause, E., Gersten, K. und Oertel, H.J., *Grenzschicht-Theorie*. 2006: Springer.
- [99] Schade, H., *Strömungslehre*. 4. neu bearb. Aufl. ed. De-Gruyter-Studium, ed. F. Kameier. 2013, Berlin [u.a.]: de Gruyter. XV, 561 S.

- [100] Schwister, K., *Verfahrenstechnik für Ingenieure : Lehr- und Übungsbuch*, ed. V. Leven. 2013, München: Hanser Verlag. Online-Ressource.
- [101] Fick, A., V. *On liquid diffusion*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1855, 10(63): p. 30-39.
- [102] Fick, A., *Ueber diffusion*. Annalen der Physik, 1855, 170(1): p. 59-86.
- [103] Cussler, E.L., ed. *Diffusion: Mass transfer in fluid systems*. 1997, Cambridge University Press.
- [104] Kraume, M., *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Vol. 2. 2012: Springer Vieweg.
- [105] Baehr, H.D. und Stephan, K., *Wärme- und Stoffübertragung*. 2013: Springer.
- [106] Anlauf, H., *Filtermedien zur Kuchenfiltration–Schnittstelle zwischen Suspension und Apparat*. Chemie Ingenieur Technik, 2007, 79(11): p. 1821-1831.
- [107] Agilent-Technologies, *Agilent Cary eclipse fluorescence spectrophotometer*, 2011, Informationsbroschüre
- [108] D'Ans, J. und Lax, E., *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*. 1998: Springer.
- [109] Oertel, H., J., Böhle, M. und Dohrmann, U., *Strömungsmechanik* 1999: Studium Technik.
- [110] Ma, J., Wang, C. und Liang, C.H., *Colloidal and electrophoretic behavior of polymer particulates in suspension*. Materials Science and Engineering: C, 2007, 27(4): p. 886-889.

B Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

a	Abstand	m
A	Fläche	m^2
A_{Bewegung}	Anteil bewegter Partikel in allen Zonen	-
$A_{\text{Bewegung, Z}}$	Anteil bewegter Partikel in Zone Z	-
A_{Haftung}	Anteil bewegter Partikel in allen Zonen	-
$A_{\text{Haftung, Z}}$	Anteil zurückgebliebener Partikel in Zone Z	-
c_A	Konzentration an Stoff A	g/l
$d_{1,h}$	horizontaler Durchmesser des Schussfadens	m
$d_{1,v}$	vertikaler Durchmesser des Schussfadens	m
$d_{2,h}$	horizontaler Durchmesser des Kettfadens	m
$d_{2,v}$	vertikaler Durchmesser des Schussfadens	m
$D_{A, B}$	Diffusionskoeffizient zwischen Stoff A und B	m^2/s
d_p	Partikeldurchmesser	m
E	Potential	V
f_{Puls}	Frequenz der pulsierenden Strömung	1/s
H	Hamakerkonstante	
h	Höhenpositon auf Faser	m
J	Flux	kg/s
j	Ionenkonzentration	mol/l
l_d	Länge Umschlingung	m
l_{Dicke}	Dicke Gewebe	m
l_{Gewebe}	Charakteristische Länge Gewebe	m
m_A	Masse des Stoffes A	kg
n	Anzahl der Umschlingungen	m

\dot{M}_{kont}	Massenstrom der Verunreinigung	g/s
$Q_{Reinigung}$	Reinigungsverhältnis	-
r	Radius	m
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert	m
r_{Filter}	Radius Filter	m
R_q	Quadratische Rauheit	m
R_R	Reinigungsrate	g/(m ² ·s)
t	Teilung	m
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
t_{Pause}	Pausenzeit	s
$t_{Prozess}$	Prozesszeit	s
t_{Puls}	Pulspause	s
v	Anström-Geschwindigkeit	m/s
$V_{A,spez}$	Flächenspezifisches Volumen	l/m ²
v_{Pore}	Porengeschwindigkeit	m/s
v_{Puls}	Pulsströmungsgeschwindigkeit	m/s
$V_{Reinigung}$	Volumen des Reinigungsfluids	m ³
W	Energie	J
x	Länge in x-Richtung	m
x	Abstand zwischen Düse und Filtermedium	m
y	Position auf Faser	m
z	Länge in z-Richtung	m
z_i	Wertigkeit der Ionen	-

Griechische Symbole

ω	Frequenz	1/s
δ	Debye-Länge	m
ζ	Zetapotential	V
β	Stoffübergangskoeffizient	m/s
ε	Porosität	-
ν_{Fluid}	Kinematische Viskosität des Fluids	m ² /s

Dimensionslose Kennzahlen

<i>Re</i>	Reynolds-Zahl
<i>Sh</i>	Sherwood-Zahl
<i>Sc</i>	Schmidt-Zahl
<i>N_{Pause}</i>	Kennzahl für Pulspause
<i>G</i>	Reinigungsgrad
<i>G_{ges}</i>	Gesamtreinigungsgrad über alle Zonen
<i>G_{ges, Z}</i>	Gesamtreinigungsgrad in Zone Z
<i>C</i>	Geometrie-Zahl

Konstanten

<i>e</i>	Elementarladung	$1,6 \cdot 10^{-19}$
<i>h</i>	Plancksches Wirkungsquantum	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
<i>k</i>	Boltzmann Konstante	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Abkürzungen

<i>PRD</i>	Plain reverse dutch
<i>TWL</i>	Twilled weave
<i>STN</i>	Satin-Bindung
<i>PET</i>	Polyethylenephtaralat
<i>PEEK</i>	QHD
<i>PP</i>	Polypropylen
<i>QHD</i>	Qualified Hygienic Design
<i>EHEDG</i>	European Hygienic Design Group
<i>VDMA</i>	Verein Deutscher Maschinen- und Apparatehersteller
<i>SK</i>	Super kalandriert
<i>K</i>	kalandriert
<i>W</i>	unbehandelt

C Anhang

C.1 Berechnung der kontaminierten Oberfläche der verschiedenen Webarten

Im Folgenden sind die Berechnungen der Mantelflächen der drei verschiedenen Gewebetypen dargestellt. Da es sich bei den untersuchten Geweben meist um kalandrierte Gewebe handelt, wird die Faser als Zylinder mit Elliptischer Grundfläche angenommen. Die Mantelfläche eines Zylinders mit elliptischer Grundfläche berechnet sich folgendermaßen:

$$A = U \cdot l = \pi \cdot \sqrt{2 \cdot (a^2 + b^2)} \cdot l \quad C-1$$

Hierbei ist U der Umfang der Ellipse, l die Länge des Zylinders, a die horizontale Halbachse und b die vertikale Halbachse der elliptischen Grundfläche.

C.1.1 Kontaminierte Oberfläche des PRD-Gewebes

Die kontaminierte Fläche $A_{kont,Schuss,i}$ des Schussfadens lässt sich für das PRD-Gewebe für mit Gleichung C-2 berechnen. Die kontaminierte Fläche bezieht sich dabei auf die betrachtete Fläche $A_{betrachtet} = 2 \cdot d_{1,h} \cdot t$.

$$A_{kont,Schuss,i} = 2 \cdot 0,5 \cdot U_1 \cdot l = 2 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{1,h}^2 + d_{1,v}^2)} \cdot l_d \quad C-2$$

U_1 beschreibt hier den Umfang des Schussfadens und l die Länge der Faser. Da hier nur die Oberfläche der kontaminierten Fläche berechnet werden soll, wird der halbe Umfang der Faser eingesetzt. Der Faktor 2 in der Gleichung kommt daher, dass in dem betrachteten Bereich 2 Fasern vorhanden sind. Für den Kettfaden lautet die Oberfläche für den betrachteten Bereich:

$$A_{kont,Kett,i} = 2 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{2,h}^2 + d_{2,v}^2)} \cdot d_{1,h} \quad C-3$$

Die Berechnung bezieht sich auf zwei Kettfäden und benutzt wiederum den halben Umfang. Die gesamte kontaminierte Fläche $A_{kont, ges}$ setzt sich aus der Summe der kontaminierten Fläche des Schuss- und des Kettfadens zusammen.

$$A_{kont,ges,i} = A_{kont,Schuss,i} + A_{kont,Kett,i} \quad C-4$$

Diese kontaminierte Fläche ist nun nur die Fläche für den betrachteten Bereich aus

Abbildung 4-5. Da der betrachtete Bereich bekannt ist, ist es nun möglich für die gesamte Filterfläche A_{Filter} die gesamte kontaminierte Fläche zu bestimmen.

$$A_{kont,ges} = \frac{A_{kont,ges,i}}{A_{betrachtet}} \cdot A_{Filter} \quad C-5$$

C.1.2 Kontaminierte Oberfläche des STN-Gewebes

Für das STN-Gewebe ist Berechnung ähnlich wie für das PRD-Gewebe. Beim STN-Gewebe handelt es sich wie in Abschnitt 4.3.2.3 erläutert um Doppelfäden und im betrachteten Bereich sind zwei Doppelfäden vorhanden. Im Gegensatz zu den Berechnungen der Porosität des STN-Gewebes werden hier für $d_{1,h}$ und $d_{2,h}$ jeweils die Einzelfäden eingesetzt.

$$A_{kont,Schuss,i} = 2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{1,h}^2 + d_{1,v}^2)} \cdot \left(2 \cdot \frac{3}{5} \cdot t + 4 \cdot 0,5 \cdot l_d\right) \quad C-6$$

Für die Fläche des Kettfadens gilt dann:

$$A_{kont,Kett,i} = 2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{2,h}^2 + d_{2,v}^2)} \cdot d_{1,h} \quad C-7$$

Mit Gleichung C-6 und C-7 ist es wiederum möglich die gesamte kontaminierte Fläche $A_{kont, ges}$ zu berechnen.

C.1.3 Kontaminierte Oberfläche des TWL-Gewebes

Für das kontaminierte TWL-Gewebe ergibt sich für den Schussfaden im betrachteten Filterbereich:

$$A_{kont,Schuss,i} = 2 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{1,h}^2 + d_{1,v}^2)} \cdot (4 \cdot 0,5 \cdot l_{d1} + 2 \cdot l_{d2}) \quad C-8$$

Für den Kettfaden gilt dann:

$$A_{kont,Kett,i} = 2 \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,5 \cdot (d_{2,h}^2 + d_{2,v}^2)} \cdot d_{1,h} \quad C-9$$

Mit Gleichung C-8 und C-9 ist es wiederum möglich die gesamte kontaminierte Fläche $A_{kont, ges}$, zu berechnen.

C.2 Berechnung der Mantelfläche der Gewebe

Die Mantelfläche setzt sich wie unter C.1 beschrieben aus der Mantelfläche des Schussfadens und des Kettfadens zusammen.

$$A_{ges,i} = A_{Schuss,i} + A_{Kett,i} \quad C-10$$

Der Index i betrachtet hierbei den betrachteten Bereich des Gewebes. Er umfasst die in Abschnitt 4.3.2 dargestellten Bereiche für das jeweilige Filtergewebe. Die Berechnung der gesamten Mantelfläche des Filtergewebes erfolgt mit Gleichung C-11:

$$A_{ges} = \frac{A_{ges,i}}{A_{betrachtet}} \cdot A_{Filter} \quad C-11$$

Die Berechnung der Mantelfläche für den jeweiligen Bereich lässt sich für die verschiedenen Gewebe mithilfe der Gleichungen aus Abschnitt 163 berechnen.

$$A_{Schuss,i} = 2 \cdot A_{kont,Schuss,i} \quad C-12$$

$$A_{Kett,i} = 2 \cdot A_{kont,Kett,i} \quad C-13$$

C.3 Kalibriergeraden für Riboflavin und Malzextrakt

C.3.1 Riboflavin

Im Folgenden sind die Kalibriergeraden für das Riboflavin gemessen am Fluoreszenzspektrometer dargestellt. Aufgetragen ist die gemessene Intensität über der Konzentration der Riboflavin-Stammlösung $c_{\text{Riboflavin}}$. Eine Gerade stellt den Konzentrationsbereich einer Zehnerpotenz dar. Alle Geraden erfolgten bei konstanter Spaltweite (Extinktionsspalt: 10 μm , Emissionsspalt: 10 μm). Die Spannungseinstellungen sind in der Legende mit U gekennzeichnet.

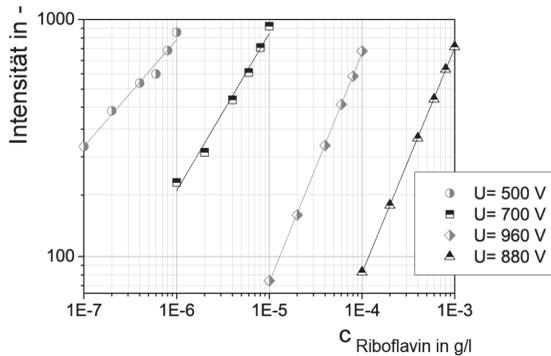


Abbildung C-1: Kalibriergeraden Riboflavin

Die Geradengleichung für die verschiedenen Konzentrationsbereiche können mit folgenden Geradengleichungen beschrieben werden.

$$c_{10^{-3}-10^{-4} \text{ g/l}} = \frac{I - 11,93}{7,55 \cdot 10^5} \quad \text{C-14}$$

$$c_{10^{-4}-10^{-5} \text{ g/l}} = \frac{I - 4,39}{7,25 \cdot 10^6} \quad \text{C-15}$$

$$c_{10^{-5}-10^{-6} \text{ g/l}} = \frac{I - 121,49}{8,1 \cdot 10^7} \quad \text{C-16}$$

$$c_{10^{-6}-10^{-7} \text{ g/l}} = \frac{I - 260,85}{6,11 \cdot 10^8}$$

C-17

C.3.2 Malzextrakt

Die Kalibriergeraden für Malzextrakt-Esculin sind in Abbildung C-2 dargestellt. Aufgetragen ist die Intensität über der Konzentration der Stammlösung an Malzextrakt-Esculin. Auch hier beschreibt eine Kalibriergerade einen Bereich von einer Zehnerpotenz. M

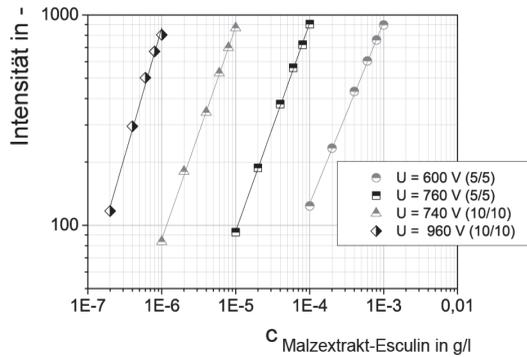


Abbildung C-2: Kalibriergeraden Esculin

Demnach lauten die Berechnungsgleichungen für die verschiedenen Konzentrationsbereiche wie folgt:

$$c_{10^{-3}-10^{-4} \text{ g/l}} = \frac{I-63,68}{8,62 \cdot 10^5} \cdot \text{g/l} \quad C-18$$

$$c_{10^{-4}-10^{-5} \text{ g/l}} = \frac{I-9,91}{8,99 \cdot 10^6} \cdot \text{g/l} \quad C-19$$

$$c_{10^{-5}-10^{-6} \text{ g/l}} = \frac{I-1,18}{8,7 \cdot 10^7} \cdot \text{g/l} \quad C-20$$

$$c_{10^{-6}-10^{-7} \text{ g/l}} = \frac{I-140,65}{9,92 \cdot 10^8} \cdot \text{g/l} \quad C-21$$

C.4 Parameter und Stoffdaten zu Abbildung 6-10

Tabelle C-1: Stoffdaten und Parameter zu Abbildung 6-10 (aufgelistet nach steigender Reynoldszahl)

Filter	v_{puls} (m/s)	A_{kont} (m ²)	l_{gewebe} (m)	Re (-)	$Sh_{\text{experimentell}}$ (-)	$Sh_{\text{berechnet}}$ (-)
PET-27	0,03	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	6,4	2,4	0,8
PET-40	0,11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	17,3	0,3	2,1
PET-22	0,10	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	20,5	9	2,5
PET-27	0,11	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	22,6	4,7	2,75
TWL-25	0,07	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	36,9	5,4	6,3
PET-27	0,23	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	45,9	10,9	5,6
STN-25	0,07	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$	89,2	13,2	16,8

C.5 Versuchsnummern und Parameter zu Abschnitt 7.2.6

Tabelle C-2: Parameter der verschiedenen Versuche bei kontinuierlicher Reinigungen bei T = 20°C

Nr.	Filter	v (m/s)	l_{gewebe} (m)	l_{tdicke} (m)	t_{prozess} (s)	d_p (µm)
1	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	10	5
2	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	10	10
3	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	300	5
4	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	150	5
5	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	25	10
6	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	60	10
7	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	10	10
8	PET-22	0,073	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	23	10
9	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	600	5
10	PEEK-12	0,06	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	10	10
11	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	100	10
12	PET-22	0,102	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	23	10
13	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	150	10
14	PEEK-12	0,102	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	23	10
15	PET-12	0,16	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	23	10
16	PET-22	0,1	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	23	10
17	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	300	10
18	PET-22	0,004	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	600	10
19	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	60	10
20	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	100	10
21	PET-22	0,06	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	150	10

22	PET-22	0,06	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	300	10
23	PET-22	0,185	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	23	10
24	PEEK-12	0,06	$4 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	600	10
25	PET-22	0,06	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	60	10
26	PEEK-12	0,06	$4 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	100	10
27	PET-22	0,06	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	60	10
28	PET-12	0,06	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	600	10
29	PET-12	0,06	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	300	10
30	PEEK-12	0,06	$4 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	150	10

C.6 Versuchsnummern und Parameter zu Abschnitt 6.3

Tabelle C-3: Parameter der verschiedenen Versuche bei pulsierender Reinigung bei T = 20°C

Nr.	Filter	v_{puls} (m/s)	l_{gewebe} (m)	l_{tdicke} (m)	t_{pause} (s)	t_{prozess} (s)	d_p (μm)
1	PET-12	4	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	0.5	17	10
2	PET-22	4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	2	15	10
3	PET-12	4	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	0.5	104	10
4	PET-12	15.4	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	0.9	36	5
5	PET-22	4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	1	11	10
6	PET-22	4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.5	17	10
7	PET-12	15.4	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	0.5	36	5
8	PET-22	4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.5	9.5	10
9	PEEK-12	11	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	0.9	43	5
10	PET-22	15.4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	2.9	37.8	5
11	PET-22	15.4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.9	36	5
12	PET-22	7.5	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.5	9.1	10
13	PET-22	15.4	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.9	10.75	5
14	PEEK-12	15.4	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	0.9	37.8	5
15	PEEK-12	11	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$1.07 \cdot 10^{-4}$	0.9	18.8	10
16	PET-22	11	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	1	4.2	10
17	PET-22	11	$1.21 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^{-4}$	0.5	5.9	10

D Publikationsliste

Leipert, C. und Nirschl, H., *Investigations of the cleanability of polymer filter media*. *Filtrieren und Separieren*, 2012. 2: p. 13.

Stahl, S., Leipert, C., und Nirschl, H., *The cleanability of particle loaded woven filter media in solid-liquid separation*. *Separation and Purification Technology*, 2013. 110(0): p. 196-201.

Weidemann, C., Stahl, S., und Nirschl, H., *Development of a qualitative test method for the cleanability of polymer woven filter media*. *Food and Bioproducts Processing*, 2013. 91(4): p. 515-524.

Weidemann, C. und Vogt, S. und Nirschl, H., *Cleaning of filter media by pulsed flow - establishment of dimensionless operation numbers describing the cleaning result*. *Journal Food Engineering*, 2014. 132, p. 29-38.

Weidemann, C., Barkholz, N., und Nirschl, H., *Removal mechanisms of particulate contaminations from polymer woven filter media*. *Separation and Purification*, 2014. 136, p. 168-176.

Bei Filtrationsanlagen in der Fest-Flüssig-Trennung ist das am schwersten zu reinigende Bauteil oft das Filtermedium. Aufgrund seiner Struktur weist es undurchlässige Stellen auf, die zu Strömungschatten führen und die Reinigung erschweren. Diese Arbeit widmet sich deshalb der Analyse der Reinigungsmechanismen von polymeren Filtermedien. Essentieller Bestandteil ist die Untersuchung verschiedener Webarten und Reinigungsverfahren (pulsierende und kontinuierliche Strömung) unter Berücksichtigung der Verunreinigungsart. Dabei steht die Erarbeitung von Kennzahlen und deren Abhängigkeiten im Vordergrund, mit deren Hilfe die Reinigung der jeweiligen Filtermedien vorhergesagt werden kann.

ISBN 978-3-7315-0322-4



9 783731 503224 >