

# **Haftkräfte, Alterung und Überwachung funktionaler Oberflächen – Gärtücher im Gebrauch**

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. Richard-Sebastian Moeller  
aus Basel

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Nirschl
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Becker
Tag der mündlichen Prüfung:	17.07.2018



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

# Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Herman Nirschl für die Möglichkeit, diese Dissertation während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) verfassen zu können. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Becker der Technischen Universität München danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Frau Dipl.-Ing. Rita Laukemper und Herrn Dr.-Ing. Mario Jekle der TU München danke ich für die offene, hilfsbereite und konstruktive Zusammenarbeit und die Einblicke in das Bäckereiwesen, dazu Herrn Dr.-Ing. Theo Koch (DIOSNA Dierks Söhne GmbH) für den fachlichen Austausch. Hierauf fußt ein Großteil der vorliegenden Arbeit.

Herrn Peter Krause (Wolftechnik Filtersysteme GmbH & Co. KG) und Herrn Jochen Kühn (Trölsch GmbH) danke ich für den intensiven Kontakt zum produzierenden Gewerbe.

Für die große praktische Unterstützung, seinen Ideenreichtum und weitsichtige Lösungskonzepte danke ich besonders Herrn Hans Guigas, ohne dessen Konstruktionen und Anlagen meine Arbeit nicht zu bewerkstelligen gewesen wäre. Für die Umsetzung danke ich den Herren Thomas Reutter, Andreas Lumppe und – stellvertretend für die ganze mechanische Werkstatt – Olaf Jörg. Außerdem möchte ich mich für die unkomplizierte Hilfe der Partikelmesstechnik, mit Klaus Hirsch, Astrid Huber und Regina Mall, und der elektrischen Werkstatt bedanken.

Für ihren Beitrag zu Ergebnissen oder Erkenntnissen danke ich meinen ehemaligen Studenten und Mitarbeitern, namentlich: Ingo Appenzeller, Ermek Asylbekov, Alexander Barilla, Nicolas Bruce, Arvid Duchardt, Katharina Gairing, Susanne Gulden, Simon Hammerich, Philipp Horstmann, Abdussamet Küçükdumlu, Holger Schubert, Simon Wachter, Johannes Winger, Chenchen Zhao.

Den Kolleginnen und Kollegen am MVM gebührt Dank für die produktive Arbeitsatmosphäre, den konstruktiven Austausch und den freundschaftlichen Zusammenhalt. Ihr habt die Zeit mit Leben gefüllt.

Mein innigster Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie für offene Ohren und ihren ausdauernden, bedingungslosen Rückhalt.

Karlsruhe, Juli 2018



# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist im Bereich technologischer Oberflächen angesiedelt. Der Fokus liegt dabei auf den mechanischen Oberflächeneigenschaften, also Maßen wie der sehr grob vereinfachenden Rauheit, ihren Einflüssen auf Haftkräfte und Reinigbarkeit sowie den Auswirkungen von Alterung. In einem zweiten Themenkomplex wird eine automatisierte Bildanalyse zur Überwachung und Schmutzerkennung auf gewebten Tüchern entwickelt. Die gesamte Arbeit bewegt sich vor dem Hintergrund der Bäckerei und ihren spezifischen Anforderungen bei der Herstellung von Brötchen, weist in der Anwendbarkeit der Erkenntnisse jedoch breiter in die allgemeinere Verwendung gewebter Textilien in der Verfahrenstechnik, insbesondere auch in der Fest-Flüssig-Filtration.

In der Bäckerei werden Brötchenteiglinge vor dem Backen auf textilen Gärtüchern gehen gelassen. Die Herausforderung liegt darin, dass der Teig nicht auf den verwendeten Oberflächen festkleben darf, sondern sich beim Abkippen schnell und zuverlässig löst. Jegliche Rückstände, ob Teigreste oder als Trennmittel eingesetztes partikuläres Mehl, neigen zum schnellen Verderb in der feucht-warmen Atmosphäre beim Gehenlassen und dienen unter anderem Schimmel als Nährboden. Aus hygienischen Gründen ist es deshalb unausweichlich, die Tücher regelmäßig zu reinigen, was mit Aufwand verbunden ist.

In einem ersten Arbeitsabschnitt untersucht diese Arbeit die grundsätzlichen Einflussparameter auf die Haftphänomene im Anwendungsbereich. Die Oberflächencharakterisierung erfolgte mittels konfokalem Laser-Raster-Mikroskop und der Auswertung der Oberflächenkartierungen gemäß der ISO 25178-2. Bei der Anhaftung von Mehlpartikeln an massiven Oberflächen stellte sich eine erhöhte Rauheit als lindernd heraus. Dies ist ein Ergebnis, dass sich mit der partikulären Hafttheorie durchaus in Einklang bringen lässt, allerdings mit der hygienegerechten Gestaltung geschlossener Anlagen für nasse Prozessmedien in einen Zielkonflikt tritt. An Gärtüchern zeigte sich der Rückhalt von Mehlpartikeln als von den Profiltälern dominiert. Sowohl ihre Tiefe als auch ihr Flächenanteil korrelierten mit der Zentrifugalbeschleunigung, die zum Entfernen der Mehlpartikel notwendig war.

Es wird von Arbeiten berichtet, bei denen das Haftverhalten von Weizenteigen beeinflusst wurde. Dort wurde allerdings der Teig verändert und damit zwangsläufig auch das spätere Bäckereierzeugnis. Einzig die Oberflächen von Apparaten und ihrer Komponenten werden im Rahmen dieser Arbeit zur Diskussion gestellt und

zur zukünftigen Optimierung untersucht, um Verbesserungen und Nachrüstungen auch durch niedrige Investitionskosten attraktiv zu gestalten.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Haftverhalten hat die Kontaktdauer, während der sich das komplexe Fließ- und Relaxationsverhalten des Weizenteigs verdeutlicht. Der Kontakt über 10 Minuten kann hier als lang betrachtet werden; bei ihm treten die mechanischen Oberflächeneigenschaften in den Hintergrund. Auf unterschiedlich geschmireltem Edelstahlblech hing die Teighaftung dann nur noch vom Alter des Teiges ab. Auf Gärtüchern zeigte sich ein Einfluss des chemischen Materials (ob Baumwolle oder Polyester). Einzig bei stark texturierten Förderbändern (Waffel- und Rippenstruktur in Millimetergröße) behielt die mechanische Gestalt auch bei langem Kontakt ihren mildernden Einfluss auf die Ablösespannung.

Bei kurzer Kontaktdauer von einer Minute ließ sich die Haftspannung des Teiges auf den Gärtüchern mit deren Profilsitzen korrelieren. Ein großer Spitzenanteil nimmt die Last des Teiges im oberen Bereich des Oberflächenprofils der Tücher auf und verhindert so die innigere Verbindung mit weiteren Oberflächenanteilen. Die Höhe der Spitzen (insbesondere die *extreme Spitzenhöhe* gemäß der ISO 25178-2) erlaubt dem Teig sich während seiner Relaxation zu deformieren ohne zusätzliche Kontaktfläche mit tieferen Profilanteilen auszubilden. In diesem Zusammenhang spielt ganz sicher die Haarigkeit der Tücher eine entscheidende Rolle: Vom Tuch abstehende Primärfasern des Garnes halten einerseits den Teig vom innigeren Kontakt mit dem übrigen Tuch auf Abstand, andererseits stellen sie mit ihrer Länge eine Strecke dar, über die sich die Haftarbeit bei der Ablösung des Teiges verteilt. Mit der Arbeit als dem Integral von Kraft und Weg kann die Ablösekraft des Teiges durch längere Haare und dadurch einen längeren Weg signifikant verringert werden.

In einem weiteren Schritt wurden drei ausgewählte Gärtücher gealtert: durch praktischen Gebrauch, durch Abbürsten und durch Waschen. Das Baumwolltuch zeigte ein nachteiliges Alterungsverhalten bei Wäsche und Gebrauch; das Waschen hatte auf alle drei Tücher technologisch nur negative Auswirkungen. Das Bürsten verbesserte die Parameter der Profilsitzen, steigerte die erkennbare Haarigkeit sehr deutlich und senkte die Teighaftung.

Im Fazit ließen sich die Optimierung der Tücher hinsichtlich des Mehrrückhaltes, also minimierte Profiltäler, und der Teigablösung, also maximierte Profilsitzen, konfliktfrei kombinieren. Für den praktischen Einsatz konnte das Bürsten als Zwischenreinigung und zur gleichzeitigen Verbesserung der Tuchoberfläche vorgeschla-

gen werden, um die Zyklen zur hygienisch erforderlichen Wäsche zu maximieren. Die Bildauswertung im zweiten Themenkomplex dieser Arbeit setzte sich zum Ziel, Verschmutzungen auf gewebten Tüchern zu erkennen. Dabei sollte von etablierten Methoden abgewichen und die Möglichkeit geschaffen werden, Kontaminationen ohne Farb- oder Helligkeitsunterschied zu berücksichtigen. Das Auswertekonzept aus Periodizitätserkennung, Schwellenwert- und Ausreißerbestimmung funktioniert ohne Eingreifen eines Anwenders und ohne Vorwissen über Tuch oder mögliche Verschmutzung. Die Funktion einer ersten Implementierung auf einem Arbeitsplatzrechner wurde anhand von Filtertüchern in einer fortschreitenden Reinigung demonstriert und kann in Echtzeit betrieben werden. Die bildanalytische Überwachung bietet erstmals die Möglichkeit, in einer Filtertuchreinigung den tatsächlichen Verschmutzungsgrad auf dem Tuch selbst zu bestimmen. Dies erlaubt, die Intensität der Reinigung durch einen geschlossenen Regelkreis anzupassen. Außerdem erübrigt sich jede Modellierung der Kontamination und der Reinigung, da der tatsächliche Zustand automatisiert greifbar wird. In diesem Sinne können somit auch Gärtücher überwacht und entsprechend ihres aktuellen Bedarfs gereinigt werden. Dadurch sollte ihre Hygiene sichergestellt und gleichzeitig ihre mechanische Lebensdauer maximiert werden.

Ein Großteil dieser Arbeit entstand während und in einer Kooperation mit dem Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie der TU München, wo eine zweite Promotionsarbeit das Forschungsfeld komplementiert.

## Summary

The present thesis makes a contribution to the research on technological surfaces. The focus is thereby on the mechanical surface properties, measures like the very coarsely simplifying roughness, its influences on adhesion and cleanability as well as the effects of aging. In a second group of topics an automated image analysis is developed for the monitoring and dirt recognition of woven cloths. The entire work progresses with respect to the needs of the baker's trade and its specific requirements with the production of bread rolls. The findings however are applicable to a broader use of woven textiles in process engineering, particularly in the field of solid-liquid filtration.

In the bakery, dough pieces are placed on proving cloths for rising. The challenge arises from the necessity of the sticky dough pieces to release quickly, fully and reliably from the cloths when tipped over. Any residue, either from dough or particulate flour as separating agent, tend to spoil readily in the moist and warm atmosphere of the rising cabinet, and nourish mold and mildew. From a hygienic point of view, washing the cloths on a regular basis is imperative and effortful.

In a first section of work this thesis examines the fundamental parameters of influence on the adhesion phenomena within the scope. Surfaces were characterized by confocal laser scanning microscopy followed by evaluation after ISO 25178:2. Flour particles adhered less on surfaces with higher roughness. This harmonizes well with common theory of particulate adhesion, but enters a conflict of interest with general rules of hygienic design for closed equipment for wet processes. On proving cloths, the retention of flour particles was dominated by profile valleys. Both the valley depth and surface share correlated with the centrifugal acceleration necessary to remove adhering particles.

Existing literature has previously described modified dough adhesion. However, the dough constitution was manipulated and thereby the final bakery product changed. In this thesis only the surfaces of apparatuses and their components are opened to the debate and evaluated for their optimization to favor easy and cost-efficient improvements and retrofits.

The duration of contact had an important influence onto the adhesive manner, which illustrates the complexity of the dough's rheology and relaxation behavior. Contact of 10 minutes could be considered long in this case; mechanical surface properties fade into the background. On differently ground stainless steel sheets



dough adhesion then only depended on dough age. On proving cloths the cloth material's chemical composition (cotton or polyester) exhibited specific effects. Only on heavily textured conveyor belts (waffle or ridge shapes in millimeter scale) their mechanical appearance maintained some of their lowering influence on dough adhesion.

After short contact durations of one minute dough adhesion could be correlated with profile peaks on proving cloths. A big surface share bears the dough's load above most of the cloths' surface and hinders it from coming into closer contact. The surface peaks' height (especially the *extreme peak heights* after ISO 251782) allows the dough to deform during relaxation while preventing additional contact with subjacent surface profile. In this context hairiness of the cloths is of major importance: Protruding primary fibers of the yarn separate the dough from more of the cloths' surface on the one hand, on the other hand the exposed length poses a distance over which the work of detachment can be spread. As work is the integral of force over distance, the dough's pull-off force is reduced by longer hairs. In a further section of work three different proving cloths were selected for ageing via three types of common impacts; brushing, washing and practical use. The cotton cloth degenerated in washing and use; use harmed all the three cloths. Brushing improved the surface peaks' parameters, boosted hairiness apparently, and eased dough release.

To conclude, both the optimization of cloth particle retention, concerning the profile valleys, and dough release, concerning the surface peaks, can be combined with no conflict. For practical applications brushing can be suggested as an intermediate cleaning step, improving the surface properties simultaneously, to maximize the service periods between hygienically necessary washes.

The image analysis in the second group of topics aims to detect soilings on woven cloths. Differing from established methods, the proposed method finds contaminations without differences in color or brightness. The concept incorporates periodicity detection, a threshold algorithm, and outlier detection. It works without supervision or prerequisite knowledge about either the cloth or possible soiling. A proof of concept was implemented on a desktop computer and demonstrated on an example series of a progressively cleaned filter cloth. It can be run in real-time. For the first time the image-analytical supervision allows for a filter cloth cleaning to detect the actual degree of contamination. This enables the adaption of the cleaning intensity on the basis of a closed-loop control. Furthermore, any

considerations about model contaminations and cleaning models become superfluous, since the actual state becomes tangible. In this way proving cloths too can be supervised and cleaned corresponding to their actual demand. Thus hygiene is ensured while their service life is maximized.

Most of this research was conducted while and in a cooperation with the Chair of Brewing and Beverage Technology of TU Munich. There a second doctoral thesis that complements the field of research.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theorie und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Viskoelastisches System Weizenteig . . . . .	5
2.2	Überblick über die Bäckerei . . . . .	7
2.2.1	Teigbereitung . . . . .	7
2.2.2	Brötchenherstellung . . . . .	9
2.3	Technologische Oberflächen in der Bäckerei – das Gärtuch . . . . .	10
2.4	Aufbau gewebter Textilien . . . . .	12
2.5	Haftkräfte und –phänomene . . . . .	14
2.5.1	Van-der-Waals-Kräfte . . . . .	14
2.5.2	Elastisch-adhäsiver Kontakt . . . . .	16
2.5.3	Haftklebstoff . . . . .	17
2.5.4	Weitere stoffliche Kraftübertragung . . . . .	18
2.5.5	Etablierte Methoden zur Messung von Haftkräften . . . . .	21
2.5.6	Etablierte Methoden zur Charakterisierung von Teig . . . . .	23
2.6	Charakterisierung von Oberflächen . . . . .	24
2.6.1	Chemische Oberflächeneigenschaften - Oberflächenenergie . . . . .	24
2.6.2	Mechanische Oberflächeneigenschaften . . . . .	25
2.7	Reinigung und Reinheit in der Verfahrenstechnik . . . . .	28
2.8	Bildauswertung und Mustererkennung . . . . .	31
2.8.1	Digitalbilder . . . . .	31
2.8.2	Partikelauswertung . . . . .	33
2.8.3	Mustererkennung . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Materialien und Methoden</b>	<b>39</b>
3.1	Weizenmehl und Weizenteig . . . . .	39
3.2	Gärtücher, Förderbänder und weitere Substrate . . . . .	40
3.2.1	Feste Oberflächen . . . . .	41
3.2.2	Gewebte Tücher . . . . .	42
3.3	Messung von Oberflächeneigenschaften . . . . .	44
3.3.1	CLSM, Auswertung nach ISO 25178-2 . . . . .	44

---

3.3.2	Oberflächenenergien (extern ermittelt) . . . . .	46
3.4	Messung der Haftkräfte mittels Zentrifugenmethode . . . . .	46
3.4.1	Mehlpartikel . . . . .	47
3.4.2	Teigproben . . . . .	49
3.5	Alterung von Gärtüchern . . . . .	51
3.5.1	Gebrauch . . . . .	51
3.5.2	Waschen . . . . .	51
3.5.3	Bürsten . . . . .	52
3.6	Bildanalytik . . . . .	53
3.6.1	Partikelerkennung . . . . .	53
3.6.2	Mustererkennung . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Haftkräfte und Alterung</b>	<b>61</b>
4.1	Textur der Oberflächen . . . . .	61
4.2	Rückhalt von Mehl . . . . .	64
4.2.1	An geschlossenen Oberflächen . . . . .	64
4.2.2	An textilen Gärtüchern . . . . .	66
4.3	Haftspannung von Teig . . . . .	68
4.3.1	An geschlossenen Oberflächen . . . . .	68
4.3.2	An textilen Gärtüchern . . . . .	72
4.4	Alterungsverhalten textiler Gärtücher . . . . .	73
4.4.1	Auswirkungen auf die Oberflächeneigenschaften . . . . .	74
4.4.2	Auswirkungen auf die Haftphänomene . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Bildanalytische Überwachung</b>	<b>83</b>
5.1	Versuchsaufbau . . . . .	83
5.2	Periodenerkennung . . . . .	87
5.3	Schmutzdetektion . . . . .	89
5.4	Rechengeschwindigkeit . . . . .	92
5.4.1	Zeitbedarf der einzelnen Rechenschritte . . . . .	92
5.4.2	Einfluss der Bildgröße . . . . .	93
5.5	Vergleich mit anderen Methoden . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick auf zukünftige Arbeiten</b>	<b>95</b>
6.1	Bedarfsgerechte Auswahl technologischer Oberflächen . . . . .	95
6.2	Behandlung der Tücher während der Nutzung . . . . .	96

---

6.3	Flächenanteil versus Höhe der Profilspitzen . . . . .	97
6.4	Gestaltung haftkraftoptimierter Gærtücher . . . . .	98
6.5	Zeitabhängigkeit der Kontaktspannung . . . . .	99
6.6	Gebrauchsdauer und Reinigungszyklen von Gærtüchern . . . . .	100
6.7	Prozessintegrierte Zustandsüberwachung von Gærtüchern . . . . .	100
6.8	Bildüberwachung zur innovativen Filtertuchreinigung . . . . .	101
 <b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>103</b>
 <b>Literaturverzeichnis</b>		<b>107</b>
 <b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>123</b>
 <b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>125</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Technologische Oberflächen unterliegen Verschleiß und Verschmutzung, dadurch verändern sich kontinuierlich ihre Eigenschaften. Verschleiß entsteht durch Materialabtrag oder -verschiebung, die ursprüngliche Form und mechanische Oberfläche wird verändert; im Falle von Beschichtungen können auch diese entfernt und das Trägermaterial mit abweichenden chemischen Oberflächeneigenschaften freigelegt werden. Bei Verschmutzung lagert sich Fremdmaterial an die Oberfläche an. Dies bewirkt in jedem Fall eine Veränderung der chemischen Oberflächeneigenschaften, während die mechanische Beeinflussung noch hinzukommt.

Gleichzeitig müssen die Oberflächen aus wirtschaftlich verfügbaren Materialien mit ökonomisch vertretbaren Methoden hergestellt werden; Produktionskontrollen und laufende Überprüfungen während des Betriebs verursachen zusätzlichen Aufwand. Das bedeutet, dass Einfachheit in jedem Fall vorteilhaft ist. Besondere Materialanforderungen können hinzukommen (chemische Beständigkeit, mechanische Festigkeit, gesundheitliche Unbedenklichkeit, Umweltverträglichkeit und Verwertbarkeit, regulatorische Vorschriften, Verfügbarkeit).

Verschmutzung bedeutet die Anwesenheit von Ungewolltem [1]. Sie kann Produkt kontaminieren und im Wert senken oder Apparate in ihrer Funktion beeinträchtigen (verengter Rohrleitungsquerschnitt, belegte Austauschflächen, verblockte Filtermedien), beziehungsweise auch als unerwünschter Haftvermittler oder mikrobieller Nährboden dienen und damit der weiteren Verschmutzung oder Kontamination Vorschub leisten. Beim Chargenwechsel kommt es zu Verschleppungen, wodurch auch unterschiedliche Produkte nicht zuverlässig voneinander getrennt werden können, was ganz besonders in der pharmazeutischen Industrie nicht hinnehmbar ist.

Im Umfeld von Bäckereien gab es bereits Bestrebungen, die Klebrigkeit von Teigen und das Verschmutzungspotential von Streumehl zu verringern. Da von den Teigeigenschaften auch spätere Produkteigenschaften abhängen, kann aufgrund eingeschränkter Verbraucherakzeptanz nicht jede technologische Möglichkeit ausgeschöpft werden. Staubverminderte Streumehle hingegen warten auch mit Vorzügen hinsichtlich des Arbeitsschutzes auf. So wird beispielsweise das Risiko der „Bäckerlunge“ als mehlverursachte Staublungereduziert, aber mutmaßlich auch

die Explosionsneigung, beziehungsweise Gefahr der Staubverpuffung, im Betrieb minimiert. Streumehle verursachen jedoch zusätzliche Kosten ohne dem Produkt einen direkten Mehrwert zuzufügen, wie beispielsweise Ölsaaten als Brötchenaufgabe, und sind damit im Idealfall ohne Einschränkungen entbehrlich. Deshalb widmet sich diese Arbeit allein den Oberflächen und ihrem Beitrag zur Interaktion und Haftung, um einerseits weiterhin mit konventionellen Zutaten etablierte Backwaren herstellen zu können, und um andererseits grundlegendere theoretische Erkenntnisse für weitere Anwendungsfälle zu gewinnen.

Eine besonders bedeutsame hygienische Schwachstelle in der Bäckerei stellen die nach wie vor traditionell verwendeten Gärtücher dar. Auf diesen gewebten Textilien liegen und reifen die rohen Brötchenteiglinge, bevor sie zum Backen auf das Backblech abgekippt werden. Bisher praktisch alternativlos sind sie, da der Weizenteig vermeintlich „hygienische“, glatte Oberflächen sehr schnell benetzt, dabei flächig anklebt und sich anschließend nur sehr schwer und langsam wieder ablösen lässt. Die Tücher weisen allerdings eine große zugängliche Oberfläche und offene Porosität auf, die dazu neigt, Verschmutzungen anzusammeln. Dies sind insbesondere überschüssiges Streumehl, sowie anhaftende Teigreste. In der gegebenen Prozessumgebung dienen sie bereits nach einigen Tagen bis spätestens Wochen den allgegenwärtigen Mikroorganismen als Nährboden. Die Tücher fangen an zu schimmeln und müssen gewaschen oder sogar ganz ausgetauscht werden. Um hier Risiko und Aufwand zu reduzieren, sollen optimierte Tücher gestaltet werden, von denen sich Teiglinge zuverlässig, vollständig und ohne Streumehl ablösen.

Abschließend wird eine Methode vorgestellt, mit der texturierte Oberflächen, wie eben die Gärtücher, im laufenden Betrieb auf ihren hygienischen Zustand hin automatisch überwacht werden können. Die vorgestellte Methode wurde ursprünglich zur bedarfsgerechten Reinigung von Filtertüchern konzipiert. Der einfacheren Modellbildung wegen wird sie hier auch in diesem Zusammenhang vorgestellt, lässt sich aber gleichfalls auch auf andere gewebte Tücher, wie zum Beispiel die Gärtücher, anwenden.



## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit setzt sich folgende Ziele:

- Das Adhäsionsverhalten und die Haftmechanismen von Mehlpartikeln an bäckereirelevanten Oberflächen zu beschreiben. Hiermit wird einerseits die in der Literatur etablierte Haftkraftmessung einzelner Partikel weitergeführt, andererseits die hygienische Schwachstelle der Gärtücher hinsichtlich partikulärer Verunreinigung gesucht.
- Haftmechanismen von Weizenteig an bäckereirelevanten Oberflächen aufzuklären. Der dabei bei Gärtüchern gesetzte Schwerpunkt klärt, welche Eigenschaften die Ablösung des Teiges erleichtern.
- Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den mechanischen Oberflächeneigenschaften, also der Texturierung der gegebenen Werkstoffe. Die chemischen Oberflächeneigenschaften und ihre Auswirkungen sollen im Rahmen einer Kooperation am Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie der TU München behandelt werden. Da klassische Rauheitsbegriffe spätestens bei der Charakterisierung von gewebten Tüchern versagen, sind geeignete Parameter zur Beschreibung der Oberflächen zu finden.
- Das mechanische Alterungsverhalten der Gärtücher zu beschreiben und die praktischen Auswirkungen zu quantifizieren. Hierbei werden unterschiedliche Einflüsse auf die Tücher ausgewertet und die Veränderungen an den Oberflächen dokumentiert. Anschließend wird der Zusammenhang zum Haftverhalten von Weizenteig ermittelt und damit die Tragweite der Alterung eingeordnet.
- Anhand des zusammengetragenen Wissens soll eine neue Generation haftkraftoptimierter Gärtücher gestaltet werden. Sie erlaubt den Verzicht auf Streumehl und gewährleistet gleichzeitig die zügige und vollständige Ablösung des Teigs. Dadurch steigert sie die Hygiene des Bäckereibetriebs und der Backwaren sowie die Zuverlässigkeit der Anlagen. Verlängerte Reinigungszyklen und damit maximierte Einsatz- und Lebensdauer der Tücher senken außerdem die Betriebskosten.
- Zum Abschluss wird ein automatisiertes Verfahren zur Überwachung der Tücher während des Gebrauchs entwickelt. Eine intelligente Bildanalyse fin-

det partikuläre Verunreinigungen auf den Tüchern, auch wenn kein Farb- oder Helligkeitskontrast besteht. Sie stellt die ausreichende Reinheit der Tücher während ihrer maximierten Reinigungszyklen sicher und dokumentiert sie. Der erarbeitete Algorithmus kann aufgrund seiner Vielseitigkeit auch zur Überwachung anderer Tücher eingesetzt werden. Das vielversprechende Beispiel der Filtertücher wird exemplarisch ausgeführt.

## 2 Theorie und Stand der Technik<sup>1</sup>

### 2.1 Viskoelastisches System Weizenteig

Stärke ist der bedeutendste Energielieferant für die menschliche Ernährung. Großen Anteil daran haben diverse Getreide [4], deren Körner an sich jedoch sehr schlecht verdaulich sind. Stärke muss für enzymatischen Abbau und die menschliche Verdauung zunächst verkleistert werden. Dieser Prozess läuft in Verbindung mit Wasser bei Temperaturen von etwa 80°C ab. Dabei löst sich die Kristallstruktur der Stärkekörner auf und die zumeist teilkristallinen Stränge des Makromoleküls werden hydratisiert [5]. Viele Lebensmittel werden deshalb gekocht, aus einigen Getreidesorten lässt sich allerdings auch Gebäck herstellen. Dafür wird das zerkleinerte Getreide als Schrot oder Mehl mit Wasser vermengt, geformt und gebacken. Aus Gründen der Prozessführung und der Produktakzeptanz beim Konsumenten sind hierfür nur *backfähige* Getreide geeignet. Das sind solche, die in Verbindung mit Wasser und gegebenenfalls nach einem besonderen Reifeprozess einen Teig bilden, der während der Gebäckherstellung formbar ist und ein leicht verzehrbares, also vor allem poröses, beim Kauen im Mund leicht rehydrierbares Gebäck liefert. Dies gelingt mit Getreiden, die mit Wasser eine elastische Masse, einen Teig bilden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit reinem Weizenteig. Dieser besteht notwendigerweise aus Weizenmehl und Wasser und üblicherweise Salz, Hefe und gegebenenfalls weiteren Zutaten. Teig ist ein komplex aufgebautes Stoffsystem, seine Struktur ist keineswegs homogen. Im Weizenteig spannt sich ein schwammartiges System aus einem raumgreifenden Netzwerk aus Weizenkleber auf. Es besteht aus hydratisierten, gequollenen Eiweißketten quervernetzter Glutelin- und Gliadinmoleküle, dem Gluten. Durch mechanische Arbeitseinwirkung durch Dehnbewegungen beim Kneten werden die makromolekularen Eiweißketten zu mikroskopischen Filmen orientiert [6]. Ihre Struktur bestimmt das makroskopische Verhalten des Teiges ganz wesentlich. Einher gehen die technologische Verarbeitbarkeit einerseits und die sensorische Akzeptanz des fertigen Gebäcks andererseits.

Das besondere rheologische Verhalten des Teiges, also die Deformationsmechanik außerhalb des Hooke'schen Gesetzes, leitet sich aus dem Zusammenspiel seiner

---

<sup>1</sup>Dieses Kapitel basiert teilweise auf den Veröffentlichungen [2, 3].

elastischen und plastischen Eigenschaften ab. Sie sind gekennzeichnet einerseits von der Weichheit und Plastizität des Systems, andererseits von der Elastizität des Klebnetzes. Hieraus folgen zum einen das Kriechen, also die Deformation unter Last, unter Umständen bereits unter dem Eigengewicht, das zunächst eine schnelle, dann eine verzögerte elastische und anschließend eine langsame plastische Verformung bewirkt. Bei Entlastung kommt es erst zur schnellen, dann zur verzögerten elastischen Rückformung [7]. Zum anderen folgt als Resultat aus den weichelastischen Eigenschaften, dass Teig klebrig erscheint [8], da er sich angelegten Oberflächen anschmiegen und sie benetzen kann. Beim Abziehen mit größeren Geschwindigkeiten kommt es durch die Scherung zu anderem mechanischen Verhalten des Teiges und er wirkt fester, wodurch er größere Kräfte überträgt und sich schlechter ablöst.

Die mechanischen Eigenschaften sind sehr empfindlich gegenüber der chemischen Zusammensetzung und dem Wassergehalt des Teiges sowie molekularer Veränderungen in den Biomolekülen einerseits. Andererseits bestimmt die mechanische Beanspruchungsgeschichte des Klebnetzes, also die bereits erfahrenen Belastungen, seinen Quervernetzungsgrad: Zunächst können noch lose Stränge durch Scherung in Kontakt kommen und sich miteinander verbinden. Fortgesetzte Belastung schädigt das ausgebildete Netzwerk allerdings, sodass es wieder zerkleinert wird. In das Klebnetzwerk lagern sich die Stärkekörnchen des Getreides und eventuelle Gasblasen ein. Außerdem ist von einer mobilen, wässrigen Flüssigphase auszugehen.

Technologisch ermöglicht es die Elastizität des Teiges einem Teigling vor dem Backen seine Form zu halten. Die *nanoskopische* Struktur sorgt für die Feuchtigkeitsverteilung, die die Stärke beim Backen verkleistern lässt, und die *mikroskopische* Struktur für den Rückhalt von Gasblasen, etwa aus dem Hefestoffwechsel, die das spätere Gebäckstück lockern und seine Porosität bewirken. [9]

Für wissenschaftliche Arbeiten hat sich die Verwendung von Modellteigen etabliert. Sie bestehen zumeist nur aus Mehl und Wasser, eventuell Kochsalz, sowie gegebenenfalls studienspezifischen Zutaten. Dadurch wird das charakteristische mechanische Verhalten nachgestellt, übermäßige störende Einflüsse beispielsweise aus mikrobieller Aktivität werden aber weitgehend unterdrückt. Allerdings bleibt der Enzymapparat des Getreides immer noch aktiv, weshalb eine deutliche Zeitabhängigkeit in manchen Teigeigenschaften auftreten kann.

## 2.2 Überblick über die Bäckerei

### 2.2.1 Teigbereitung

*Rohstoffe: Zusammensetzung von Weizen, Auswahl, Dosierung*

Diese Arbeit beschränkt sich beim Einsatz von Teig auf reinen Weizenteig. Das Weizenkorn besteht aus dem lipidreichen Keimling, dem Mehlkörper als wesentlichem Speicherorgan, sowie Samenschalen. Die das Korn umgebende Spreu wird grundsätzlich beim Dreschen entfernt. Für die Bäckerei besitzt der Mehlkörper den höchsten Wert, der einen Großteil der Stärke in sich konzentriert. Die Stärkekörnchen betten sich in einer proteinreichen Matrix, die der keimenden Pflanze als Vorrat an Aminosäuren dient, oder eben mit seinem Klebereiweiß die verfahrenstechnischen Eigenschaften des Teiges bestimmt. Der Keimling ist mit seinem Vitamin- und Mineralstoffgehalt zwar ernährungsphysiologisch wertvoll, seine wenig sauerstoffbeständigen Lipide sorgen jedoch für ein schnelles Ranzigwerden im Mehl. Zusammen mit den ballaststoffreichen Schalen wird er während des Mahlens über die Prozessführung ausgesondert, um möglichst helle Mehle mit besonders hoher Qualität zum Backen zu produzieren. Je höher der Anteil an Keimling und Kleie am Mehl ist, desto höher ist auch sein Mineralstoffgehalt, der über den Aschegehalt die Typisierung des Mehles nach DIN 10355 [10] bestimmt. Die mineralstoffreichen Teile des Korns beinhalten weitere Substanzen, welche die technologischen Eigenschaften des Teiges negativ beeinflussen. Dies begründet die Charakterisierung des Mehls über diesen einfachen Parameter.

Das Mehl wird aus dem Endosperm des Weizenkorns gemahlen, das im Wesentlichen aus Stärkekörnchen besteht, die sich in eine eiweißreiche Matrix betten. Da die Stärkekörnchen offensichtlich fester sind als die sie umgebende Matrix, überstehen sie die Mahlung. Die Struktur des Weizenkorns bleibt im Mehlpartikel erhalten, wodurch seine Oberfläche an Waschbeton erinnert. Die Körnchen der Weizenstärke weisen eine bimodale Größenverteilung auf [11]; hier maßen die größeren, dominanten, aus den Mehlpartikeln herausragenden Körnchen etwa 15-20  $\mu\text{m}$ , jedoch unter 25  $\mu\text{m}$  im Durchmesser, kleine bis etwa 7  $\mu\text{m}$  (siehe Abbildung 2.1 links). Weizenstärke ist bei Raumtemperatur in Wasser nicht löslich. Beim Mahlen werden die Weizenkörner in mehrstufigen Verfahren aufgebrochen und gesiebt und gesichtet. Neben der Abreicherung unerwünschter Kornbestandteile wird hier die Partikelgrößenverteilung des Mehls eingestellt (siehe Abbildung 2.1 rechts).

Zur Teigherstellung werden die erforderlichen Zutaten ausgewählt und eingewogen.

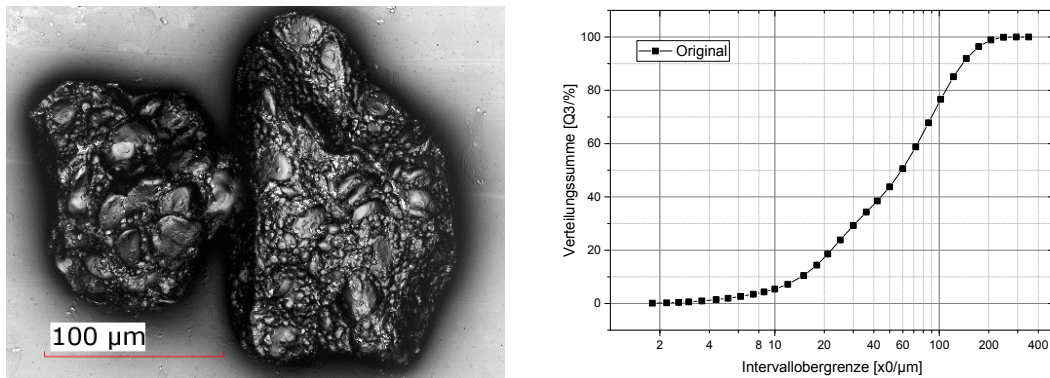


Abbildung 2.1: Weizenmehl. Links: CLSM-Aufnahme von zwei Mehlpartikeln, zu erkennen sind die großen und die kleinen Stärkekörner. Rechts: Partikelgrößenverteilung des Ausgangs-Weizenmehls *Rosenmehl*.

Übliche Bezugsgröße ist die Mehlmasse, wobei sie auf einen bestimmten Feuchtegehalt korrigiert wird. Speisesalz hat neben seinem geschmacklichen Wert über seinen Ionengehalt einen großen technologischen Nutzen auf die Teig rheologie. Das hydratisierte Eiweiß des Klebers reagiert auf die Anwesenheit der Ionen und wird fester. Der Teiglockerung dient Hefe; sie setzt Kohlendioxid frei, das Gasblasen bildet, die im Klebernetzwerk zurückgehalten werden. Wasser ist notwendig zum Quellen der Mehlbestandteile und bildet damit überhaupt eine Voraussetzung zum Ausbilden eines Teiges. Ein höherer Wassergehalt im fertigen Produkt steigert dessen Verkaufsgewicht und wird auch deshalb angestrebt.

### *Kneten - Ausbildung der Teigstruktur*

Die eigentliche Teigstruktur wird allerdings durch den Quervernetzungsgrad im Klebernetzwerk bestimmt. Quervernetzungen bilden sich erst unter Scherung und Einwirkung mechanischer Arbeit, dem Kneten. Dabei verbinden sich zum einen die Eiweißmoleküle chemisch, zum anderen wird der Weizenkleber gedehnt und mikroskopisch in einzelne Filme aufgezogen. Zwischen diese betten sich dann die unlöslichen Stärkekörnchen, auch die Gärgase der Hefe werden zur Lockerung zurückgehalten.

Unter mechanischer Last können die gebildeten Bindungen auch wieder geschädigt und aufgerissen werden. Dabei nimmt nicht nur die Dehnbarkeit der Kleberfilme ab, sondern auch ihre Wasseraufnahmefähigkeit. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich ein Optimum des Knetens und der mechanischen Teigentwicklung.

### *Teigruhe*

Während der anschließenden Teigruhe bekommt die Hefe Zeit, ihren Stoffwechsel anzufahren und ihre Aktivität zu steigern. Neben Aromabildung und enzymatischen Abbaureaktionen an Teigbestandteilen fällt als Produkt auch Kohlendioxid an, das als Gasblasen Poren im Teig bildet und ihn dadurch lockert. Haben sie eine gewisse Größe erreicht, (so) können sie durch kurzes, erneutes Kneten zusammengedrückt, ihre Wände verklebt und dadurch ihre Zahl vermehrt werden. Ihre Größe nimmt bei fortgesetzter Teigruhe wieder zu.

## **2.2.2 Brötchenherstellung**

### *Teigteilung und Teigformung zum Teigling*

Die Charge reifen Teigs wird in Mengen entsprechend der späteren Brötchen portioniert. Die Einzelportionen werden abhängig von der Brötchensorte durch Walzen, Falten, Eindrücken, Aus- und/oder Aufrollen geformt, außerdem können Einschnitte an der Oberfläche dem späteren Aufreißen beim Backen vorbeugen. Da die so geformten Teiglinge durch die mechanische Bearbeitung an Volumen verlieren und Spannungen in den Oberflächen vorhanden sein können, lässt man sie erneut gehen.

### *Stückgare: Gehen Lassen der Teiglinge*

Aus verschiedenen Gründen ist es vorteilhaft, die Teiglinge für diese Stückgare auf ihre spätere Oberseite zu legen. Um die Teiglinge nach dem Gehenlassen auf das Backblech zu übertragen, werden sie abgekippt, wobei sich Ober- und Unterseite wieder vertauschen. Während des Gehens liegen die Teiglinge im Gärschrank in einer feucht-warmen Umgebung, bei der die Schweißwasserbildung an der Auflagefläche wahrscheinlich ist. Da der Teigling dadurch zu stark anhaften würde, sodass er nicht mehr auf das Backblech abgekippt werden könnte, ist eine besondere Auswahl für die Lageroberfläche zu treffen. Gärtücher erfüllen diese Anforderungen, zwar nicht ideal, so doch traditionell und zumeist ausreichend in gewohnter Weise. Einen weiteren Behelf stellen zusätzlich aufgebrachte Trennmittel dar. Üblich sind Speisefett, beziehungsweise -öl, oder Streumehl. Beide verursachen Kosten und benötigen zusätzliche Auftragseinrichtungen. Außerdem verändern sie meist durch ihre Anwesenheit das Erscheinungsbild des Produkts und können natürlich auch selbst als Verunreinigung der Anlage auftreten. Konventionelles Weizenmehl

als Streumehl stellt überdies durch seine Staubneigung eine Gesundheitsgefahr am Arbeitsplatz dar: Die Bäckerlunge ist eine spezifische Form der Staublunge und als Berufskrankheit anerkannt.

### *Backen*

Die fertig gereiften Teiglinge mit erwünschtem Grad an Aroma, Porosität und Lockerung werden im Ofen gebacken. Durch die Temperatureinwirkung dehnt sich das gehaltene Gas noch einmal weiter aus; das Klebereiweiß denaturiert, wird fest und verliert seine Wasserhaltefähigkeit. Gleichzeitig verkleistert die Weizenstärke bei der erhöhten Temperatur und nimmt dabei frei werdendes Wasser auf. An der Oberfläche bilden sich eine Kruste und Röstaromen. Das fertige Brötchen ist unter möglichst geringem Wasserverlust durchgegart, jedoch nicht verbrannt.

## **2.3 Technologische Oberflächen in der Bäckerei – das Gärtuch**

Die Bäckerei stellt ein Umfeld mit leicht verderblichen Lebensmitteln dar. Dies zieht hohe Anforderungen hinsichtlich der hygienegerechten Gestaltung von Apparaten und Anlagen nach sich. An erster Stelle steht dabei die chemische und physikalische Sicherheit der Werkstoffe und Komponenten: Sie dürfen keine Substanzen oder Bestandteile an das Prozessgut abgeben, sie müssen lebensmittelecht sein. Außerdem darf das Prozessgut nicht durch Bruchstücke, Späne oder sonstige Fremdkörper (beispielsweise abgeplatzte Beschichtungen der Einrichtungen) kontaminiert werden. Direkt nachfolgend steht die Anforderung an die Sauberkeit der Oberflächen: Schmutz darf sich nicht an ihnen absetzen; sollte er es doch tun, so muss er leicht wieder zu entfernen sein. Die erstrangigen Forderungen sind in der Regel gut erfüllbar, die nächsten stellen jedoch häufig nur Idealvorstellungen dar. Über allem steht zusätzlich noch das Gebot der Wirtschaftlichkeit, das unter dem Kostendruck der gesamten Lebensmittelbranche besonders schwer wiegt. Hinzu kommt auch noch, dass für gewebte Textilien oder vergleichbare Oberflächen unter dem Hygieneaspekt Normen oder vergleichbare Gestaltungsrichtlinien weder hinsichtlich der Konstruktion, noch hinsichtlich der Reinigungs- und Wechselintervalle, noch der Lebensdauer verfügbar sind.

Die Teigoberfläche verlangt beim Gehenlassen eine hohe Luftfeuchtigkeit, damit sie nicht antrocknet und aufreißt. Die Hefe braucht es überdies warm, um ih-



ren Stoffwechsel zu betreiben. Da der viskoelastische Weizenteig während der Zeiträume, die zur Hefeaktivität nötig sind, fließt, sich setzt und innere Spannungen abbaut, tendiert er auch dazu, seine Auflage zu benetzen. Aus diesem Grund eignen sich ebene oder besonders glatte Flächen nicht als Unterlage zur Teigruhe: Aufliegender Teig relaxiert, fließt die sehr kurze Strecke in die mikroskopische Oberfläche, benetzt sie und verbindet sich intensiv mit ihr. Die Trennung der Verbindung im Erdschwerefeld wird dann unwahrscheinlich, auf jeden Fall sehr langsam. Dies ist für den Bäckereibetrieb nicht hinnehmbar. Da dieser Effekt der Oberflächenform auch bei niedrighaftenden Werkstoffen, wie beispielsweise den Fluorkohlen(wasser)stoffen Polytetrafluorethen (PTFE, „Teflon“) und Polyvinylidendifluorid (PVDF) auftritt, stellt ihre Verwendung keine Lösung der Problemstellung dar. Auch laufen solche Oberflächen Gefahr zu verschleifen, zu verkratzen und dabei ihre positiven Eigenschaften zu verlieren. Gestützt durch ihre verhältnismäßig geringen Investitionskosten können sich deshalb die traditionell verwendeten Gärtücher noch am Markt halten.

Die Verwendung texturierter Oberflächen ist jedoch ambivalent. Durch die Abkehr von der flachen Ebene vergrößert sich die Oberfläche und es entstehen Profilbereiche, die zwangsläufig schlechter zu erreichen und damit schlechter zu reinigen sind als die glatte Fläche. Es liegt hier also ein Zielkonflikt in der hygienegerechten Gestaltung vor: Auf der texturierten Fläche haftet weniger an, eine Ebene lässt sich dagegen leichter reinigen. In der Praxis soll möglichst wenig gereinigt werden müssen und es sollen auch keine engen oder starren Intervalle dazu vorgeschrieben werden. Damit ist es vertretbar, den Fokus auf die geringere Anschmutzneigung zu legen und dafür eine intensivere Reinigung in Kauf zu nehmen, wenn diese dafür seltener nötig wird.

Im praktischen Einsatz kommt es vor, dass trotz aller Bemühungen Rückstände auf den Gärtüchern zurückbleiben. Dabei handelt es sich zumeist um überschüssiges Streumehl oder um feine Teigreste. Nur im schlimmsten Fall werden ganze Stücke aus dem Teigling gerissen, wodurch er zum Ausschuss und das Tuch ungeeignet direkt unbrauchbar wird.

Am Tuch anhaftende Rückstände ziehen im Gärschrank Feuchtigkeit und werden unweigerlich von ubiquitären Fremdhefen und Schimmelpilzen besiedelt [12, 13]. Das feuchtwarme Klima begünstigt ihr Wachstum, Teig und feuchtes Mehl stellen einen leichtverfügbaren Nährboden dar. Pilzbefall ist nicht nur unhygienisch, ekelerregend und unzulässig [14], die Pilze stellen auch ein Gesundheitsrisiko dar. Sie



Abbildung 2.2: CLSM-Aufnahmen von Gärtuchoberflächen: links ein Baumwolltuch, rechts ein Polyestertuch; Bildbreite je 2,3 mm

können zum Teil sogar eingesetzte Werkstoffe angreifen und damit die Produktionsanlagen zerstören. Deshalb ist die regelmäßige Kontrolle der Tücher und ihres Zustandes wichtig, die gelegentliche Wäsche unausweichlich. Für diese Wäsche müssen die Tücher aus den Anlagen demontiert, für die Dauer der Reinigung und des Trocknens ersetzt und danach unter erneutem Arbeitsaufwand wieder eingebaut werden. Das Abbürsten der Tücher verringert als leichte Zwischenreinigung Anhaftungen und minimiert dadurch Ausfallzeit, Arbeitsaufwand und direkte Reinigungskosten der intensiven Wäsche.

## 2.4 Aufbau gewebter Textilien

Bei der Textilherstellung werden in mehreren Einzelschritten große zumeist zweidimensionale Gebilde aus kleinen Fäden oder Fasern aufgebaut. Jeder einzelne Herstellungsschritt bietet eine Einfluss- und Eingriffsmöglichkeit hinsichtlich der Eigenschaften des Endprodukts. Die Schritte decken dabei alle überstrichenen Größenskalen ab, vom Mikrometergroßen Durchmesser der Einzelfaser bis zu mehreren Millimetern des Webmusters. Dadurch lassen sich Textilien auch auf jeder dieser Größenskalen spezifisch anpassen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden als Textilien nur gewebte Tücher betrachtet. Ihr Aufbau gliedert sich wie folgt (siehe auch Abbildung 2.3): Primärfasern können natürlichen Ursprungs sein (wie im Falle von Baumwolle) oder „synthetisch“ aus der Schmelze (beispielsweise Polyester) oder Lösung (beispielsweise Viskose) gesponnen werden. Während die Synthefasern zumeist einen runden Querschnitt, eine

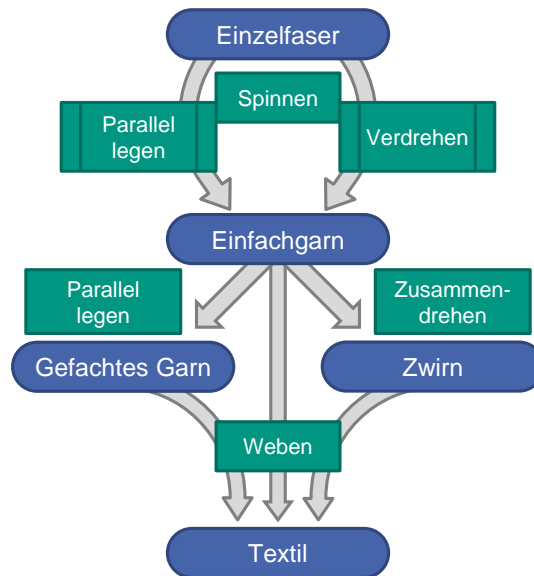


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau gewebter Textilien (Erläuterungen im Text).

gleichmäßige Erscheinung, einstellbaren Durchmesser und theoretisch unendliche Länge besitzen, wachsen Baumwollfasern in spezifischen Längen von bis zu 25 mm mit eher nierenförmig bis rechteckigem Querschnitt und krauser, gewundener Erscheinung (siehe auch Abbildung 2.2). Um daraus ein ausreichend langes Garn zu fertigen, müssen diese Fasern miteinander verdrillt, versponnen werden. Endlose Fasern können auch durch Parallellegen zu Garn kombiniert oder bei ausreichendem Durchmesser direkt als Monofilament weiterverarbeitet werden. Das gewonnene Einfachgarn kann direkt weiterverwendet, zu Mehrfachgarn parallel gelegt oder mit mehreren Garnsträngen zu Zwirn verdrillt werden. Das nun anschließende Weben bedeutet das nach einem regelmäßigen Muster (Rapport) Unter- und Überkreuzen der senkrecht zueinander verlaufenden Kett- und Schussfäden. Verschiedene Webmuster entstehen durch unterschiedliche Regeln zur Anordnung beziehungsweise zu den Abständen zwischen den Überkreuzungen. Jedes Webmuster kann wiederum in seiner Fadendichte (Anzahl Fäden pro Längeneinheit) und in seiner Einarbeitung (Länge des gestreckten Garnes pro Länge des resultierenden Tuches) angepasst werden. Übliche Nachbehandlung sind das Krumpfen als feucht-heiße Behandlung für Baumwolle oder das Thermofixieren als Hitzebehandlung für Polyester. Beide zielen auf einen Abbau innerer Spannungen im Gewebe und die Vorwegnahme eines späteren Schrumpfens, das sonst spätestens bei der ersten Wäsche auftritt.

## 2.5 Haftkräfte und –phänomene

Haftkräfte zwischen Partikeln und Oberflächen sind ein sehr weit verbreitetes Phänomen, das nicht nur Erscheinungsbild, Eigenschaften und Handhabbarkeit von Schüttgütern beeinflusst oder bestimmt, sondern auch die Sauberkeit von Anlagen und ihrer Umgebung.

### 2.5.1 Van-der-Waals-Kräfte

In trockener Umgebung stellen die Van-der-Waals-Kräfte in der Regel die häufigsten und wichtigsten Haftkräfte dar. Sie werden durch relativ schwache Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen hervorgerufen. Man unterscheidet dabei drei verschiedene Arten, abhängig von ihrer Ursache und Mechanismus [15]:

- Elektrostatische Wechselwirkungen zwischen zwei dauerhaften Dipolen: Keesom-Wechselwirkung zwischen zwei Dipolen,
- Debye-Wechselwirkung zwischen einem permanenten Dipol und einem polarisierbaren Molekül (Dipol-induzierter-Dipol-Kräfte),
- Londonsche Dispersionswechselwirkung (London-Kräfte) zwischen zwei polarisierbaren Molekülen (Induzierter-Dipol-induzierter-Dipol-Kräfte).

Die letztgenannte steht dabei für die Van-der-Waals-Wechselwirkung im engeren Sinne. Sie beruht allein auf spontaner Dipolbildung durch lokale Fluktuationen der Elektronendichte in einem Atom oder Molekül. Diese induziert in einem benachbarten Teilchen einen weiteren Dipol durch ihr elektrisches Feld sofern ihr Abstand gering genug ist. Durch die umgekehrte Proportionalität der Kraft zur sechsten Potenz des Abstandes schwächt sie sich schon bei sehr geringer Entfernung ab und verschwindet bereits nach einigen wenigen Nanometern Trennung. Hamaker leistete eine theoretische Herleitung von einzelnen Molekülen aus [16]. Um die Interaktion zweier Körper zu berechnen, summierte er anschließend die Wechselwirkungen zwischen all ihren Teilchen auf. Ein häufiger Anwendungsfall ist dabei sein Modell der einzelnen Kugel des Radius  $R$  im Abstand  $D$  zu einer ebenen Platte:

$$F = \frac{-A \cdot R}{6D^2} \quad (2.1)$$

mit der Hamakerkonstante

$$A = \pi^2 C \rho_1 \rho_2 \quad (2.2)$$

Sie beinhaltet die Atomdichten  $\rho_1$  und  $\rho_2$  der wechselwirkenden Körper, sowie den Wechselwirkungskoeffizienten  $C$  für die Partikel-Partikel-Interaktion. Die Hamakerkonstante trägt die Einheit einer Energie. Lifschitz [17] und Dzyaloschinskii [18] führten ihre Herleitung von makroskopischen Stoffeigenschaften aus, um die Kraft zwischen zwei Festkörpern mithilfe der elektromagnetischen Primitivität beziehungsweise des Brechungsindex zu berechnen.

Bei Partikel-Partikel-Kontakt oder Rauheiten an realen Oberflächen beschrieb Derjaguin die Geometrie der Kontaktzone mit dem effektiven Radius  $R_{eff}$  aus den beiden Radien der in Kontakt tretenden Kugelkalotten  $R_1$  und  $R_2$ , beziehungsweise Oberflächen [19]:

$$R_{eff} = 2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.3)$$

Hieraus leitet sich ab, dass bei stark ungleichen Radien stets der kleinere dominiert. Rumpf passte die geometrisch sehr einfachen Modelle Hamakers an idealisierte Unebenheiten an und verwendete Derjaguins Effektivradius [20]. Rumpf legte eine kleine Halbkugel als Rauheit auf eine Ebene und ließ sie mit einer größeren Kugel mit Radius  $R$  interagieren. Bei sehr kleinen Radien  $r$  dieser Kalotte wirkt sie als Abstandshalter zwischen den beiden größeren Körpern, die nun über die Mindestkontaktdistanz der Born'schen Abstoßung  $H_0$  zuzüglich der Rauheitshöhe interagieren. Die Rauheit verhindert dadurch die engere Interaktion der beiden Haftpartner und senkt die übertragbare Haftkraft zwischen ihnen, während sie selbst kaum Kräfte ausübt. Ab einem gewissen Kalottenradius und damit auch Abstand der beiden größeren Geometrien, der von der Partikelgröße abhängt, trägt auch die aufliegende Unebenheit mit ihrem Material zur Van-der-Waals-Haftung signifikant bei:

$$F = \frac{A}{6 \cdot H_0^2} \cdot \left( \frac{rR}{r+R} + \frac{R}{(1+r/H_0)^2} \right) \quad (2.4)$$

Rabinowitsch verknüpfte Rumpfs Modell über geometrische Überlegungen mit der

RMS-Rauheit (Root Mean Square, nach ISO 25178-2 [21]: quadratische Mittenrauheit  $R_q$  beziehungsweise  $S_q$ ) durch einen konstanten Faktor [22].

Greenwood und Williamson erweiterten die Theorie auf wesentlich realistischere Rauheiten, indem sie eine stochastische Höhenverteilung zahlreicher gleichartiger Profilsitzen auf einer Ebene annahmen [23]. Eine normale Anpressung bringt die Oberflächen in Kontakt: Je größer der Anpressdruck, desto mehr Spitzen treten in Interaktion. Je mehr Spitzen des Substrats anliegende Partikel berühren, desto stärker werden auch die Bindung und die übertragene Haftkraft.

Kumar [24] thematisierte Archards Motiv der Rauheit als „Höcker auf Höcker auf Höcker“ [25] und ging von einer ebenen Oberfläche mit mehreren überlagerten Welligkeiten abnehmender Periodenlänge aus. Entspricht ein aufliegendes kugelförmiges Partikel mit seinem Durchmesser einer konkaven Wölbung, so wird es durch die größere Zahl an Kontaktstellen einen wesentlich stärkeren Zusammenhalt erfahren, als wenn es etwas kleiner oder auch nur wenig größer wäre und damit in einem Napf entweder hauptsächlich den Grund und nicht die Ränder erreicht oder nur an den Rändern aufliegt und nicht in den Grund ragt.

Für praktisch relevante Partikel kommt die reine Kugelform kaum in Betracht. Hier muss mindestens von gleichmäßigen Rauheiten ausgegangen werden, wie sie beispielsweise von Eber modelliert wurden [26]. In ihrem Verständnis lagert sich ein nanoskopisches Trennmittel auf die mikroskaligen Wirtspartikel. Treffen dann solche zusammen, werden sie durch das Trennmittel auf Abstand gehalten, während an den Nanopartikeln neue Verbindungen entstehen. Auch Hartmüller folgte diesem Ansatz und legte den Dreipunkt-Kontakt nahe: Der Kontakt zweier großer Partikel oder Körper wird über eine stabile Dreiecksconfiguration zwischenliegender Feinstpartikel vermittelt [27].

Weiler synthetisierte eine Reihe unterschiedlich stark eingedellter Partikel mithilfe einer Sprühtrocknung [28]. Zunehmend tiefe konkave Näpfe ließen immer weniger ursprüngliche Oberfläche mit immer geringerem Krümmungsradius hervorstehen. Entsprechend nahmen auch ihre Haftkraft ab und ihre Redispersierbarkeit zu, sodass Agglomerate leichter aufbrachen.

## 2.5.2 Elastisch-adhäsiver Kontakt

Einen anderen Weg beschritten Johnson, Kendall und Roberts, die den Haftpartnern erlaubten, sich elastisch zu deformieren [29]. In der Nähe der Kontaktzone ziehen sich die Oberflächen durch die Van-der-Waals-Kraft an. Dies deformiert

sie, sie kommen näher aneinander und ziehen sich dadurch noch stärker an, die Kontaktfläche vergrößert sich. An ihrer äußeren Kante halten sich Van-der-Waals-Anziehung und elastische Rückstellkraft die Waage, sodass im Kontaktbereich ein Hals entsteht. Durch die zusätzliche Anziehung im Randbereich ziehen die beiden Haftpartner so sehr aneinander, dass dicht am Kontaktpunkt der Druck derart groß wird, dass hier die elastische Abstoßung überwiegt.

Die konkrete Ausformung von Kontaktzone und Materialhals hängt von der Elastizität und Festigkeit der beiden Oberflächen ab. Die aufgestellten Theorien von Johnson, Kendall und Roberts [29], beziehungsweise Derjaguin, Müller und Toporov [30] (*JKR-* und *DMT-Modell*), stellen durch die Zuordnung des harten und des weichelastischen Haftpartners zwei Grenzfälle desselben Problems dar und unterscheiden sich deshalb auch nur in einem festen Faktor. Durch beide Modelle lassen sich Haftarbeit und eine gewisse Kontaktfläche durch die Oberflächenenergie verknüpfen [31]. Das JKR-Modell findet häufiger Verwendung und liefert eine Haftkraft  $F_A$ :

$$F_A = \frac{-3}{2} \gamma_{12} \pi R \quad (2.5)$$

mit der Oberflächenenergie  $\gamma_{12}$  zwischen den beiden Körpern und Partikelradius  $R$ ; bei einer großen weichen Kugel auf einer harten Ebene. [32]

### 2.5.3 Haftklebstoff

Trotz ihres verhältnismäßig geringen Betrags können Van-der-Waals-Kräfte die Adhäsion größerer Körper wesentlich bestimmen, insbesondere dann, wenn einer der beiden sehr weich beziehungsweise fließfähig ist. Die geringe innere Starrheit erlaubt es dann diesem Körper, sich zu deformieren und sich der Oberfläche des anderen anzupassen und quasi zu benetzen. Dies reduziert Oberflächenenergie und setzt damit Oberflächenenergie frei. Die Anhaftungsfähigkeit und –geschwindigkeit an rauen oder unebenen Oberflächen hängt von den rheologischen Eigenschaften bei verhältnismäßig niedriger Deformationsgeschwindigkeit ab, die Festigkeit der Verbindung hingegen von den rheologischen Eigenschaften bei höherer Deformationsgeschwindigkeit. Das Verhältnis viskoser zu elastischen Kräften bestimmt das Versagensverhalten: Adhäsionsbruch bei niedrigem, Kohäsionsbruch bei hohem Quotienten. Dieses Verhalten ist von Haftklebstoffen bekannt beziehungsweise sind

diese hierüber definiert. Ihre Haftkraft steigt in den ersten Minuten bis Stunden während sie ihren Untergrund zunehmend benetzen ([33] in: [34, 35]).

#### **2.5.4 Weitere stoffliche Kraftübertragung**

##### *Feststoffbrücken*

Sehr große Haftkräfte können zwischen Partikeln durch Feststoffbrücken übertragen werden. Diese können aus partikeleigenem Material bestehen und sich durch Sintern oder lokales Schmelzen im Kontaktbereich bilden. Dabei genügt in heterogen aufgebauten Partikeln eine niedrigschmelzende Komponente. Erhärtende Bindemittel finden gelegentlich bei der gewollten Agglomeration Anwendung, vor allem wenn ohnehin erforderliche oder erwünschte Zusatzstoffe diese Funktion erfüllen können.

Ein anderer Brückenbildungsmechanismus herrscht vor, wenn die Kapillarbrücken zwischen feuchten Partikeln austrocknen und darin gelöste Bestandteile auskristallisieren. Diese nichtflüchtigen Substanzen können gewollt mit der Flüssigkeit zugegeben werden, unter Umständen jedoch auch aus den Partikeln selbst herausgelöst werden. Besonders interessant sind Rekristallisationsprozesse, die von amorphen Feststoffen ausgehen. Die amorphe Phase kann häufig Wasser absorbieren, dieses wird dann während der Rekristallisation freigesetzt und löst die Partikel an, bevor es verdunstet. Sind mehrere Kristallmodifikationen mit unterschiedlichen Kristallwassermengen möglich, so sind noch komplexere, temperaturabhängige Prozesse möglich. [36–39]

##### *Formschluss*

Formschluss gewinnt Bedeutung, wenn Partikel in Vertiefungen verklemmen oder hinter Hinterschneidungen wandern können, wo sie festgehalten werden. Auch Schlaufen können sie umfassen. Theoretisch kann Formschluss sehr große Kräfte übertragen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte beispielsweise beobachtet werden, wie sich Mehlpartikel in der Oberflächenstruktur von Textilien zunächst absetzen und dann fest anhafteten.

##### *Kapillarkräfte*

Auch niedrigviskose Flüssigkeiten können an Partikeln statisch Kräfte übertragen, wenn sie Kapillarbrücken bilden. Dabei kommt den Oberflächenenergien be-



sondere Bedeutung zu. Zum einen ist für die Übertragung von Zugkräften eine möglichst gute Benetzung der Partikeloberfläche nötig, also ein kleiner Kontaktwinkel. Zum anderen sollte die Oberflächenspannung der Flüssigkeit selbst hoch sein. Diese Kombination bewirkt, dass einerseits der Flüssigkeitsmeniskus an den festen Oberflächen hält, andererseits die Oberflächenspannung für eine starke Einschnürung der Brücke sorgt. Der entsprechend geringe Krümmungsradius ruft nach der Young-Laplace-Gleichung eine große Druckdifferenz hervor; die konkave Einschnürung und der Unterdruck im Meniskus weisen gegenseitig aufeinander hin. Bei vollständiger Benetzbarkeit vereinfacht sich die Geometrie und die durch eine Kapillarbrücke zwischen einer starren Kugel und einer starren Ebene übertragene Kapillarkraft  $F_{Kap}$  beträgt:

$$F_{Kap} = -4\pi\sigma_l R \quad (2.6)$$

Sie ist dann nur von der Oberflächenspannung  $\sigma_l$  der Flüssigkeit und dem Partikeldurchmesser abhängig. Bei unvollständiger Benetzung und verschiedenen Kontaktwinkeln  $\theta_1$  und  $\theta_2$  an den beiden Festkörpern beträgt die Kapillarkraft:

$$F_{Kap} = -4\pi\sigma_l R \cdot \cos \theta \quad (2.7)$$

mit der Mittelung

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2} \quad (2.8)$$

Zur geometrischen Situation siehe auch Abbildung 2.4.

### *Kapillarkondensation*

Üblicherweise beschreibt die Dampfdruckkurve die Koexistenz von Flüssig- und Dampfphase. Diese gilt allerdings nur für ebene Grenzflächen. Die Kelvin-Gleichung beschreibt die Veränderung des Dampfdrucks  $p_k$  über gekrümmten Oberflächen im Verhältnis zum Dampfdruck  $p_v$  über der Ebene:

$$\ln \frac{p_k}{p_v} = \frac{\gamma \cdot V_m}{R_m \cdot T} \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.9)$$

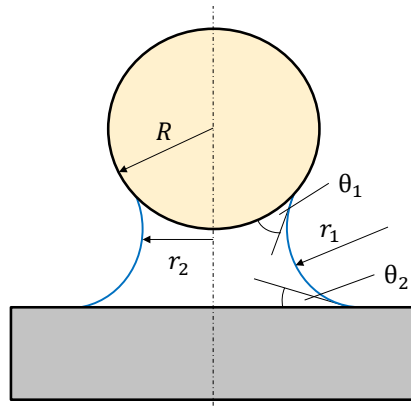


Abbildung 2.4: Schema zur Kapillarkraft, Formelzeichen im Text.

mit der Oberflächenenergie  $\gamma$ , dem molaren Volumen  $V_m$ , der Gaskonstante  $R_m$ , der absoluten Temperatur  $T$  und den beiden Hauptkrümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  der Flüssigkeitsoberfläche. Über Tropfen bedeutet dies eine Dampfdruckerhöhung, über einer konkaven Phasengrenze, wie einem benetzenden Meniskus, jedoch eine Dampfdruckverringern. Dadurch ist ein Flüssigkeitsmeniskus auch bei unter-sättigtem Dampfdruck thermodynamisch stabil, beziehungsweise kondensiert Wasserdampf aus untersättigter Luft in ausreichend enge Poren und Zwickel. Mit ansteigender relativer Luftfeuchtigkeit wachsen damit auch die Menisken in ihrer Größe an. Bei realen, rauen „ebenen“ Oberflächen ergibt sich damit die Situation, dass bei geringen Luftfeuchtigkeiten die sehr kleinen Menisken nur mit den Rauheitsspitzen interagieren. Ab einer kritischen Luftfeuchtigkeit sorgt der Benetzungswinkel des flüssigen Wassers für ein Überspringen von der Rauheitsspitze auf die zugrunde liegende Ebene. Dabei taucht die Rauheit vollständig in die Flüssigkeit ein.

Ein interessanter Aspekt bei der Kapillarkondensation ist ihr Einfluss auf die trockene Van-der-Waals-Haftung. Da die Hamakerkonstante nur im Vakuum gilt und durch Medien hindurch stark gemindert wird, schwächt sich die Van-der-Waals-Kraft im Bereich des Meniskus ab, während die Kapillarkraft hinzukommt. Dadurch kommt es zu einer gewissen Kompensation. Erst ab einer bestimmten Meniskengröße besitzt die verlorene Van-der-Waals-Kraft keine Relevanz mehr beziehungsweise die Gesamtkraft nimmt deutlich zu. [31, 39–41]

### 2.5.5 Etablierte Methoden zur Messung von Haftkräften

Die in der Literatur beschriebenen Methoden zur Haftkraftmessung lassen sich in drei Gruppen einteilen: die direkte Messung der Haftkraft sowie die Ablöseversuche unter linearer Beschleunigung oder unter Zentrifugalbeschleunigung.

Bei der direkten Messung wird ein Partikel mit einem Untergrund, dem Substrat, in Kontakt gebracht und gleichzeitig auf die dabei auftretende Kraft rückgeschlossen. Eine verhältnismäßig große experimentelle Umsetzung beschreiben Tabor und Winterton für die Haftkraftmessung zwischen zwei rechtwinklig gekreuzten Zylindern, die der Kugel-Platte-Geometrie entsprechen [42]. Eine Zylinderschale ist dabei auf einem piezoelektrischen Heber montiert, die andere an einer Blattfeder bekannter Federhärte befestigt. Der Abstand wird über die Aufhängung verringert, bis die Anziehungskräfte die beiden Körper sprunghaft aneinanderzieht. Das Produkt aus Federhärte und letzter stabiler Distanz entspricht dann der Van-der-Waals-Kraft. Der Abstand wird über Weißlichtinterferenz beobachtet. Die Autoren berichteten nur von Ergebnissen mit molekular ebenen Glimmer-Oberflächen, deren Krümmungsradius etwa 10 mm betrug.

Diese Methode wurde zum Rasterkraftmikroskop (atomic force microscope, AFM) weiterentwickelt. Eine Messspitze oder ein Probenkörper wird an einer feinmechanischen Blattfeder (cantilever) befestigt, deren Auslenkung kapazitiv oder mit einem rückwärtig montierten Reflektor anhand ihres optischen Reflexionswinkels überwacht wird. Substrat und Messspitze werden über ein Piezoelement im Abstand zueinander positioniert. Dieses Prinzip nutzt auch der Pulvertester von Shimada [43]. Durch das zusätzliche Umpositionieren in der Normalenebene lassen sich am AFM flächige Messungen durchführen. Durch das Abrastern der Substratoberfläche mit einer sehr feinen Spitze lässt sich eine Höhenkarte anfertigen. Mit einem Probenkörper lässt sich analog zu den Glimmerzylindern die Haftkraft zum Substrat messen. Da bei der Van-der-Waals-Kraft geringste Rauheiten und Unterschiede in der Kontaktzone großen Einfluss haben, ergeben sich bei Mehrfachmessungen desselben Aufbaus breite Streubereiche. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass Partikel nur in einer zufälligen aber festen Orientierung an der Blattfeder befestigt werden können, die nicht unbedingt der natürlichen Orientierung im Kontakt mit einer Oberfläche entspricht. Dies ist nur für wohldefinierte Geometrien wie monodispers kugelige Partikel auf atomar ebenen Flächen anzunehmen [44]. Diese an sich sehr präzise Methode entspricht insofern nicht den Anforderungen und Gegebenheiten der Realität. Statistisch abgesicherte Ergebnisse erfordern

zahlreiche Versuche mit vielen, unterschiedlichen Partikelkonfigurationen. Mit der Beschleunigungsmethode lassen sich viele Partikel gleichzeitig vermessen. Zur linearen Beschleunigung wurden verschiedene Umsetzungen vorgeschlagen: Früh beschrieben Deryagin und Zimon einen Versuchsaufbau mit einer in Normalenrichtung vibrierenden Scheibe [45]. Ermis berichtet von einem Falltester, bei dem die Haftpaarung aus dem freien Fall durch abrupten Aufprall abgestoppt wird; dabei erzielten sie die 250-fache Erdbeschleunigung [46]. Hein et al. erreichten auf einem Piezoschwinger unter sinusförmiger Anregung Beschleunigungen, die der 450-fachen Erdbeschleunigung entsprachen [47]. Wanka et al. entwickelten einen Versuchsaufbau, der mittels Impaktor longitudinale Stoßwellen in einem Titanstab erzeugt [48]. An dessen Ende können Beschleunigungen bis zum dreihunderttausendfachen der Erdbeschleunigung experimentell genutzt werden. Allerdings herrscht die entscheidende, maximale Beschleunigung jeweils nur über kürzeste Augenblicke, was auch nur entsprechend kurze Deformationswege bis zur eventuellen Ablösung ermöglicht. Abgelöste Partikel müssen gleichzeitig entfernt werden, damit sie nicht wieder anhaften. Üblicherweise trägt sie ein gerichteter Luftstrom weg, was diese Methoden auf relativ ebene Oberflächen beschränkt. Damit eignen sich diese Methoden zwar für kleine Partikel, starre Körper, mechanisch stabile Substrate und spröden Bruch, aber weder zur Untersuchung der flauschigen Textilien noch zum Ablösen des nachgiebigen Systems von weichem Teig.

Die Zentrifugenmethode nach Krupp bietet wohldefinierte, gerichtete und langanhaltende Beschleunigungen, die in den anhaftenden Körpern gleichmäßige Kräfte hervorrufen [49]. Sie ist die einzig geeignete Möglichkeit, die Haftkraft einer großen Zahl an Partikeln an einer eher diffusen Oberfläche zu messen und damit der Problemstellung zu begegnen, die Vielzahl an Anhaftungs- und Einbettungsmöglichkeiten in die voluminöse, fluffige Oberflächentextur der Tücher zu berücksichtigen. Dort können sich Partikel in unterschiedlichen Tiefen in unterschiedlichen Orientierungen und Konfigurationen einlagern. Betrag und Richtung der Zentrifugalbeschleunigung können sehr genau eingestellt und über längere Zeiträume ausgeübt werden, sodass sich lösende Partikel Zeit und Gelegenheit erhalten, das gewundene und poröse Oberflächensystem zu durchwandern und zu verlassen. Es ist die bis zu etwa zehntausendfache Erdbeschleunigung standardmäßig mit Laborzentrifugen umsetzbar.

Experimentelle Anwendung fand die partikuläre Haftkraftmessung zunächst in der

Grundlagenforschung. Analog zu den Theorien widmeten sich auch anfängliche Versuchsarbeiten den einfach verständlichen Geometrien von glatten Kugeln und ebenen Flächen [50]. Auch Fuller und Tabor beschrieben den Einfluss von Rauheit anhand kugeliger Partikel [51]. Salazar-Banda et al. verglichen die Haftkräfte von verhältnismäßig runden Maniokstärkepartikeln mit denen von ungleichmäßig gebrochenen Phosphatgesteinspartikeln [52] und Weiler et al. untersuchten die Selbstanhaftung von gleichmäßig unebenen, eigens synthetisierten Dextranpartikeln [28]. Die Arbeit von Hartmüller et al. über partikuläre Trennmittel im Offsetdruck betrachtet überdies die Verteilung von Kontaktpunkten zwischen Partikeln und Substrat [27]. Komplexere Geometrien der Haftpartner erfordern ein immer genaueres Wissen über ihre Kontaktzonen, ihre Anordnung und ihre Ausrichtung bezüglich der Substratoberfläche, um Versuchsdaten klassisch zu interpretieren. Praktische Fragestellungen fanden sich bisher in der pharmazeutischen Entwicklung von Pulvern [53], insbesondere bei Formulierungen zur Inhalation [28, 54–56], zur Matritzenfüllung von Tablettierpressen [57] oder in der Reinigung: Die Mikroelektronik- und Chipindustrie ist auf molekular reine Oberflächen angewiesen, die idealen Oberflächen sehr nahe kommen. Aber auch das Anhaftvermögen von Kochsalz auf Kartoffelchips ist von Interesse [58]. Auch innovative Verfahren erfordern genaue Kenntnisse über auftretende Haftkräfte, wie in der Hochgradienten-Magnetseparation, für die proteinbeschichtete superparamagnetische Partikel aneinander [59] und an Polyvinylchlorid, Cellulosefilz und Edelstahl [60] vermessen wurden.

### 2.5.6 Etablierte Methoden zur Charakterisierung von Teig

Das wichtigste Phänomen hinsichtlich der Teig-anhaftung ist die Klebrigkeit – die Eigenschaft, sich bei Kontakt ohne thermische oder chemische Aktivierung direkt an eine Oberfläche zu binden. Dieses Verhalten ist von den Haftklebstoffen bekannt und wurde im Zusammenhang mit Teig von Heddleson et al. beschrieben [61]. Chen und Hoseney entwickelten eine weitverbreitete Methode zur Klebrigkeitsmessung mittels Zugversuch [62]. Hierbei wird eine frische Teigoberfläche mit einem Messstempel definiert in Kontakt gebracht/angepresst und anschließend mit konstanter Geschwindigkeit abgezogen. Dabei dehnt sich der Teig und löst sich oder reißt. Die aufgenommene Kraft-Weg-Kurve gibt über verschiedene Parameter Auskunft: insbesondere die maximale Zugkraft, die Wegstrecke bis zur Trennung und die geleistete Arbeit. Zusammen mit dem Messaufbau (dem

Texture-Profile-Analyzer, TPA) zählt die Methode nach Chen und Hosoney zu den Standardverfahren in Mühlen- und Bäckereilaboratorien zur Teigcharakterisierung. Wang et al. beschrieben den engen Zusammenhang zwischen Klebrigkeit und viskoelastischen Eigenschaften von Teig [63] und Jekle und Becker belegten dies mittels kleinamplitudiger Schwingscherversuche [64]. Bockstaele et al. führten kombinierte Kriech-Relaxation-Versuche durch [7] und Ghorbel und Launay vermaßen tatsächliche Haftkräfte von Teigen zu festen Oberflächen [65]. All diese Arbeiten zielten jedoch darauf, die Eigenschaften des Teiges zu verändern. An der vorliegenden Arbeit ist neu, dass nicht die Zusammensetzung des Teiges variiert, sondern sich die Oberflächen der Haftpartner unterscheiden. Damit erhalten sich zum einen die ursprünglichen Produkteigenschaften des späteren Gebäckstückes, zum anderen ermöglicht erst dieses Vorgehen, die Zusammenhänge zu den Oberflächeneigenschaften herauszuarbeiten.

Ein weiteres Manko der Kraft-Weg-Messung nach Chen und Hosoney mit dem Texture Profile Analyzer ist, dass sie der Haftverbindung eine bestimmte Deformationsgeschwindigkeit aufprägt [62]. Dies entspricht jedoch nicht der praktischen Situation in der Bäckerei, wo sich Teiglinge kraftgetrieben ablösen sollen. An dieser Stelle empfiehlt sich deshalb die Zentrifugenmethode.

## 2.6 Charakterisierung von Oberflächen

### 2.6.1 Chemische Oberflächeneigenschaften - Oberflächenenergie

Gerade im Zusammenhang mit Haftkräften spielen Interaktionen an Oberflächen eine wesentliche Rolle. Ihre Natur beruht auf dem Zusammenwirken intermolekularer Kräfte, deren Unterschiede an Grenzflächen auch makroskopisch zum Vorschein treten. Das Verhalten von Flüssigkeitstropfen auf ebenen Flächen beschrieb bereits Young mit dem Kontaktwinkel an der Dreiphasengrenze zu Luft [66]. Er rührt nach der Young'schen Gleichung von den verschiedenen Oberflächenspannungen der drei Grenzflächen her:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_s - \sigma_{sl}}{\sigma_l} \quad (2.10)$$

an den Grenzflächen Feststoff-Gasphase (Index  $s$ ), Feststoff-Flüssigphase (Index  $sl$ ) und Flüssigphase-Gasphase (Index  $l$ ). Diese Wechselwirkungen hängen jedoch stärker von individuellen Materialeigenschaften ab. Und Fowkes legte erstmals dar,

dass sich die beobachtete Oberflächenenergie aus einzelnen Komponenten zusammensetzt [67]. Owens nannte ihren der spontan induzierten Van-der-Waals-Kraft entsprechenden Beitrag den *Dispersanteil* und den Rest, leicht vereinfachend, *Polaranteil* [68]. Die Oberflächenenergie zwischen Flüssig- und Festphase ergibt sich dann zu:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^d \cdot \gamma_l^d} - 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^p \cdot \gamma_l^p} \quad (2.11)$$

mit den dispersen (hochgestellt d) und polaren Beiträgen (hochgestellt p) und Indizes wie zuvor. Kaelble [69] und Rabel [70] beschreiben das Vorgehen über die Kontaktwinkelmessung verschiedener Flüssigkeiten auf einem Festkörper: Bei Verwendung einer rein unpolaren Substanz kommt es nur zu unpolaren Wechselwirkungen, deren Betrag bei der Kombination mit einer auch polaren Flüssigkeit abgezogen werden kann. Somit sind beide Beiträge einer unbekanntes Oberflächenenergie experimentell mittels zweier bekannter Flüssigkeiten zugänglich. In der praktischen Umsetzung wird ein Tropfen der Probenflüssigkeit auf die zu bestimmende Oberfläche gesetzt und der sich einstellende Kontaktwinkel optisch vermessen; dies ist als *Sessile-Drop-Technik* bekannt.

### 2.6.2 Mechanische Oberflächeneigenschaften

Dass die Benetzungseigenschaften einer Oberfläche nicht nur von ihren chemischen Oberflächeneigenschaften, also den Oberflächenenergien der flachen Ebene, abhängt, sondern auch von ihrer Textur, also der mechanischen Beschaffenheit, berichtete bereits Wenzel [71]. Er argumentierte, dass eine raue Fläche eine größere Oberfläche besitzt als ihre ebene Projektion. Entsprechend verhält sich die Grenzflächenenergie unter einem aufliegenden Tropfen: Der makroskopische Kontaktwinkel stellt sich im thermodynamischen Gleichgewicht zwischen mikroskopisch benetzter Auflageoberfläche und Flüssig-Gasphasen-Grenzfläche ein. Das Benetzungsverhalten des Feststoffs wird durch seine Rauheit oder Textur verstärkt. Die entstehenden Unterschiede können laut Wenzel den eigentlichen Materialeinfluss zwischen verschiedenen Stoffsystemen deutlich übertreffen [71]. Die Betrachtung der mechanischen Oberflächeneigenschaften muss daher in der Kontaktmechanik zwingend beachtet werden.

Die Normung zur Geometrischen Produktspezifikation nennt Rauheit und Welligkeit als Gestaltabweichung bei Oberflächen und misst ihnen verschiedene Ska-

lengrößen bei. Sie rühren von verschiedenen technologischen Eingriffen bei der Herstellung der Oberflächen und Einflüssen der Alterung her.

Zur Charakterisierung von Oberflächen wird zunächst ein Modell der Oberfläche erstellt, eine Höhenkartierung des Körpers. Verschiedene Messverfahren stehen dafür zur Verfügung, die sich in berührende und nichtberührende Methoden einteilen lassen. Eine der ältesten ist das mechanische Abtasten mit einer Messspitze, beispielsweise mit einem Tastschnittgerät. ISO 3274 schreibt eine kegelige Tastschneidspitze von  $60^\circ$  oder  $90^\circ$  mit abgerundeter Spitze vor; ihr Radius betrage 2, 5, oder  $10\ \mu\text{m}$  [72]. Diese wird mit konstanter Geschwindigkeit über die zu vermessende Oberfläche bewegt und die vertikale Position dabei aufgezeichnet. Aus der Geometrie der Spitze folgt, dass sie der physikalischen Grenzfläche nicht folgen kann, insbesondere wenn Vertiefungen und Spalten feiner oder steiler als die Messspitze sind. Hieraus wird auch ersichtlich, weshalb nur ein Modell der Oberfläche gewonnen wird; auch andere Messprinzipien besitzen ihre entsprechenden Schwächen. Die Abweichungen hängen mit von der Größe der Messspitze ab. Ihre Miniaturisierung bis hinab in den atomaren Größenbereich ist möglich und als Anwendung des Rasterkraftmikroskops (AFM, siehe Abschnitt 2.5.5) bekannt. Oberflächenmessungen mit dem AFM sind jedoch zeitaufwändig und auf sehr kleine Räume beschränkt. Mechanische Tastschnittgeräte liefern in der Regel nur linienhafte Höhenmessungen, keine flächigen. Diese sind mit dem AFM und den moderneren, berührungslosen optischen Verfahren leicht zugänglich.

Optische Oberflächenvermessungen können beispielsweise auf der Fokusvariation, der Interferenz, oder Konfokaltechniken basieren. Bei der Fokusvariation wird das Objekt mit unterschiedlichem Fokus fotografisch aufgenommen. Anschließend wird für jede Stelle im Bild diejenige Aufnahme gewählt, die den entsprechenden Punkt am schärfsten abbildet. Ist zu jedem Einzelbild die Brennweite bekannt, so lässt sich darüber für jeden scharfen Bildpunkt die zugehörige Tiefeninformation ableiten. Bei der Interferenz wird die Überlagerung eines Referenzstrahlenganges mit der Reflexion des kohärent beleuchteten Objektes ausgenutzt. Abhängig von der Wegdifferenz kommt es zu wellenlängenabhängigen Überlagerungen und Auslöschungen des Lichts. Die Konfokaltechniken basieren gemeinsam auf der Verwendung von zwei Lochblenden: Der Beleuchtungsstrahl wird durch die erste auf das Objekt fokussiert. Die Beleuchtungsintensität ist in der Fokusebene am höchsten, es kann aber aus dem gesamten Strahlengang Licht zurückgeworfen werden. Der Abbildungsstrahl wird durch die zweite Lochblende fokussiert. Licht, das nicht aus



der Fokusebene stammt, wird hier größtenteils abgefangen, sodass den Detektor Licht annähernd nur aus der betrachteten Schärfeebene erreicht und Streulicht unterdrückt wird.

Die Norm DIN EN ISO 4287 geht von einzelnen Profillinien aus [73], also der Höheninformation entlang einer Messstrecke, und definiert einfache Parameter zur Beschreibung. Die bekanntesten sind die arithmetische Mittelrauheit  $Ra$  als gemittelter Betrag der Abweichung von der Mittellinie des Profils:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2.12)$$

mit der Länge  $l$  der Messstrecke und den Ordinatenwerten  $Z(x)$ ; sowie die quadratisch gewichtete Rauheit  $Rq$ :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.13)$$

Die modernere Norm DIN EN ISO 25178-2 greift auch diese Parameter auf, erweitert die Methodik allerdings auf flächige Oberflächenkartierungen, wobei die oben genannten Rauheitsparameter aus der *flächigen* Messung mit  $Sa$  (arithmetische Mittenrauheit) und  $Sq$  (quadratisch gewichtete Rauheit) bezeichnet werden [21]. Sehr viel wichtiger ist jedoch die Einführung deutlich weiter reichender Beschreibungsmöglichkeiten für die Höhenverteilung von Oberflächen. Die flächige Betrachtung berücksichtigt anisotrope Texturen, es entfällt also beispielsweise die Unterscheidung, ob parallel oder senkrecht zu einer Schliffrichtung gemessen wurde.

Beide Normen unterscheiden zwischen langperiodischer Welligkeit und kurzperiodischer Rauheit und sehen verschiedene Bandpassfilter zur Auftrennung vor. Die Grenzen hängen von den Definitionen, konkreten Anwendungen, Normen, Messmethoden und auch –auflösungen ab. Im Zusammenhang der Haftkräfte fester Partikel spielt die skalenmäßig größere Welligkeit höchstens dann eine Rolle, wenn sie im Sinne von Kumar et al. [24] der Partikelgröße entspräche und durch ihre Form mit den anliegenden Partikeln hinreichend übereinstimmt. Ansonsten wird der Kontakt durch die mikroskopischen Unebenheiten der Rauheit dominiert (siehe auch Gleichung 2.3). Diese Unebenheiten beschrieb Rabinovich über ihre Amplitudenhöhe und ihre Periodenlänge, also den Abstand zwischen zwei benachbarten

Rauheitskuppen [22].

Die Norm DIN EN ISO 25178-2 geht jedoch noch deutlich weiter in ihrem Angebot an Parametern. Ein wesentlicher Schritt zu ihrer Erschließung ist die Aufteilung des Oberflächenprofils in die drei Domänen Spitzen, Kern und Täler [21]. (Das konkrete Vorgehen ist in Abschnitt 3.3.1 beschrieben.) Dieser Einteilung liegt die flächenhafte Verteilung des Materialanteils zugrunde, also die Verteilungssumme der Profilhöhe. Der Hintergrund hierzu ist, dass nun die Oberfläche mit mehr als nur einem Parameter, wie mit einem integralen Rauheitswert, beschrieben werden kann. Es wird ersichtlich, ob die Rauheit beispielsweise auf wenige Extrempunkte oder viele gleichmäßige Unebenheiten zurückgeht, ob prominente Erhabenheiten hervorstehen, oder ob wenige tiefe Kratzer und Riefen für einen gewissen Rauheitsbetrag verantwortlich sind. Der theoretische Hintergrund liegt zwar im Maschinenbau mit seinen Kontakttheorien und dem tragenden Materialanteil an Auflageflächen bei Metall-Metall-Kontakten unter Normallast, die Anwendung erweist sich jedoch auch im Zusammenhang mit Gärtüchern als hilfreich.

Den drei Domänen des Oberflächenprofils kann dann jeweils sowohl ein Höhenbereich, als auch ein Materialanteil zugeordnet werden. Die Spitzen werden im Kontakt zweier fester Ebenen als erstes belastet werden und damit auch am meisten Druck erfahren. Im klassischen Maschinenbau sind es dann die Täler, die Schmiermittel aufnehmen, verteilen und bei Bedarf bereitstellen können. Diese Depotfunktion kommt auch im Rahmen dieser Arbeit, jedoch in ganz anderer Anwendung, zum Tragen.

## 2.7 Reinigung und Reinheit in der Verfahrenstechnik<sup>2</sup>

In den letzten Jahren gewann die Reinigbarkeit von Apparaten und deren Komponenten zunehmende Aufmerksamkeit. Die herausragenden Hygieneanforderungen der Pharmaindustrie verursachen bedeutsamen Reinigungsaufwand. Jedem möglichen Einsparpotential steht aufgrund der gesetzlichen Produkthaftung das Risiko schwerwiegender Folgekosten für fehlerbehaftete Produkte entgegen. Deshalb ist die Motivation gering, den Rahmen an potentiellen Einsparungen auszuschöpfen. Produktionslinien für die Spezialitätenchemie und hochreine Reagenzien und Formulierungen müssen flexibel mit verschiedenen Produkten einsetzbar sein, um gewinnbringend betrieben werden zu können. Die strikte Trennung unterschied-

---

<sup>2</sup>Dieser Abschnitt basiert zum Teil auf den Veröffentlichungen [74, 75].

licher Chargen durch die vollständige Entfernung hinterlassener Rückstände ist Grundvoraussetzung zum Erhalt der Qualität. Am offensichtlichsten ist dies in der Farb- und Pigmentherstellung, aber auch in verbrauchernäheren Branchen, wo Wettbewerbsfähigkeit und Innovationen auf hohen Qualitätsstandards gründen. Insbesondere in der Lebensmittelindustrie verlangen Verbraucherschutz, Produkthaftung und Erwartungen hinsichtlich gleichbleibender Qualität und langer Haltbarkeit gründliche Reinheit. Allein in Deutschland gibt es jährlich etwa 65 Millionen Magen-Darm-Erkrankungen, welche überwiegend durch verunreinigte Lebensmittel übertragen werden [76]. Als Querschnittstechnologie ist die Fest-Flüssig-Trennung in all diesen Bereichen anzutreffen [77, 78], Verbesserungen in diesem Feld richten sich deshalb an einen großen Anwenderkreis und versprechen ein breites Nutzungspotential.

Filtertücher stellen das Herzstück von Filtrationsprozessen im Bereich der Fest-Flüssig-Trennung dar und sind auf Grund ihres Materials, ihrer Webart und Maschenweite charakteristisch für den Filtrationserfolg. Die Reinigung von Filtermedien ist wegen ihrer prinzipbedingt feinstrukturierten Oberfläche schwierig. Die große technische Relevanz ergibt sich, da eine – verhältnismäßig grobe – Reinigung prozesstechnisch in jeder Filtration mindestens hilfreich ist, um Feststoffrückstände zu entfernen und die freie Filterfläche für den nächsten Filtrationszyklus wieder bereitzustellen [74]. Gär- und Filtertücher können prinzipiell als artverwandt angesehen werden: Es handelt sich um textile, gewebte Flächengebilde aus gängigen Werkstoffen mit ähnlichen Einsatzprofilen.

Reinigung und Hygienisierung sollten von vornherein als wesentlicher Bestandteil eines Lebensmittelprozesses und seiner apparativen Umsetzung betrachtet werden [79]. Die tägliche Reinigung am Schichtende ist gängig. Sollten jedoch verschiedene Produkte auf derselben Anlage gefahren werden, so hängt die Reinigungserfordernis auch von der Häufigkeit der Produktwechsel ab [80]. In einem Filterapparat ist das Filtermedium das am schwersten zu reinigende Bauteil [81]. Seine große spezifische Oberfläche macht es anfällig für Adsorption und Anlagerungen. Die Zusammensetzung aus durchlässigen und undurchlässigen Regionen verursacht eine breite Verteilung an fluidmechanischen Strömungsdomänen und Wandschubspannungen; dies hat Strömungstotzonen zur Folge, die Verschmutzungen zurückhalten [82]. Deshalb ist zur Reinigung der hygienischen Schwachstellen an Filtermedien eine dermaßen hohe Intensität nötig: Wasser wird mit bis zu 10 MPa auf Filtertücher gespritzt, um anhaftende und eingelagerte Partikel abzulösen und ihre

Ansammlung zu verhindern [83].

Zahlreiche Normen und Richtlinien konnten bereits den hygienischen Gestaltungsstandard einiger Apparate und Komponenten anheben [1, 84, 85], jedoch existiert bis heute noch keine solche Hilfe für Filtertücher. Darum ist eine besonders gründliche Reinigung noch immer unabdingbar. Automatisierte Reinigungsprozeduren müssen jedoch validiert werden, meist an standardisierten Maximalverschmutzungen [86].

Bestehende Reinigungsabläufe sind starr gestaltet und berücksichtigen keine individuellen Verschmutzungszustände. Um eine erfolgreiche Reinigung gewährleisten zu können, muss sich die starre Reinigungsprozedur an einem vorbestimmten Auslegungsfall als Worst Case orientieren. Im praktischen Einsatz wird die Verschmutzung geringer ausfallen, was unweigerlich zu Verschwendung führt. Ist die Auslegung hingegen unzureichend, wird auch die Reinigung unzureichend ausfallen [74]. Es findet in der Regel auch keine Kontrolle der gereinigten Oberflächen mehr statt. Aus diesem Grund wird die Reinigungsprozedur um einen Sicherheitsaufschlag intensiviert, was wiederum Zeit- und Ressourcenbedarf steigert mit den zugehörigen negativen Folgen für Umwelt und Wirtschaftlichkeit [87]. Da die unterschiedlichen Anschmutzungen an den Apparateoberflächen auch unterschiedlich stark zurückgehalten werden, führt die Auslegung nach dem einen Worst Case zur besonders deutlichen Überdimensionierung in den meisten Einzelfällen [74]. Um sich den Sicherheitsaufschlag zu sparen, ist ein geschlossener Regelkreis für die Reinigungsintensität erforderlich. Es kann der Aufpralldruck des Strahls eingestellt werden, sowohl über den Fluiddruck, als auch über den Abstand Düse zu Tuch, das Reinigungstempo, oder zumindest die Wiederholung eines Durchlaufs. Die bedarfsorientierte Reinigung kann sogar Voraussetzung zur wirtschaftlichen Installation und Nutzung eines automatischen, integrierten Reinigungssystems sein [88]. Als Zusatznutzen kann ein solches Überwachungssystem in jedem Einzelfall den Beweis der erfolgreichen Reinigung der beobachteten Oberflächen erbringen. Damit wird auch die Modellierung von Verschmutzung und Reinigung mit allen zu treffenden Annahmen überflüssig. Auch kann die Überwachung zur schnellen automatischen Kontrolle oder Entwicklung eines von regulatorischer Seite vorgeschriebenen Reinigungsprogrammes eingesetzt werden.

In der Praxis beschränkt sich die Fähigkeit einer Schmutzerkennung auf die der Sensoreinheit zugänglichen Oberflächen. Mauermann et al. [89] und Joppa et al. [90] führten den Machbarkeitsnachweis in der Behälterreinigung über die Autofluo-

reszenz organischer Verschmutzungen auf nicht fluoreszierendem Edelstahlblech. Die beschriebene Methode ist in ihrem Einsatzfeld jedoch beschränkt. Bezüglich der Filtertuchreinigung erscheinen drei wesentliche Nachteile: Beleuchtung und Anregung basieren auf relativ energiereicher UV-Strahlung; organische Filtertücher würden unter dieser Bestrahlung sehr ähnlich fluoreszieren und damit die Beobachtung des Schmutzes überlagern und behindern. Außerdem sind die organischen Filtertuchmaterialien sehr empfindlich gegenüber UV-Strahlung, die eine schnelle Zersetzung der Filtermedien bewirkt. Zum dritten ist es nicht gesagt, dass auch anorganische Kontaminationen entsprechend fluoreszieren und erkennbar wären.

Glücklicherweise zeigen gewebte Filtertücher eine relativ regelmäßige Oberflächenstruktur, von der sich Schmutz als Unregelmäßigkeit abhebt. Selbst in Fällen von gleicher Farbe von Schmutz und Filtertuch bleibt ein Unterschied in Form und Helligkeit erkennbar. Allerdings ist die erkennbare Regelmäßigkeit tatsächlicher Tücher durch Herstellung, Handhabung, Verschleiß und Bildaufnahme nie perfekt. Dennoch kann mit Methoden der Bildauswertung, Mustererkennung und anschließender Ausreißerdetektion ein praktischer Lösungsweg beschrrieben werden. Zunächst ist die Größe des Webmusters und damit der die Textur bestimmende, sich wiederholende Bereich zu ermitteln. Saubere Bereiche werden beispielsweise eine gleichartige Verteilung von Helligkeit und Kanten aufweisen; diese werden in einem zweiten Schritt gewonnen. Zuletzt werden die möglicherweise unreinen Bereiche markiert und eine automatisierte Entscheidung getroffen, ob der Bildausschnitt sauber ist oder nicht. Damit ist eine automatische Bildauswertung zur Schmutzerkennung möglich, die keine Information über das Textil, denkbare Verunreinigung oder Farbkontraste zwischen den beiden benötigt.

## 2.8 Bildauswertung und Mustererkennung<sup>3</sup>

### 2.8.1 Digitalbilder

Die Aufgabe der digitalen Bildauswertung besteht häufig darin, anhand von nicht immer eindeutigen aber wahrscheinlichkeitsbehafteten Bildinformationen zuverlässig klare Entscheidungen zu treffen. Entsprechend der Vielzahl an denkbaren praktischen Einsatzmöglichkeiten steht eine große Palette an Methoden und Al-

---

<sup>3</sup>Dieser Abschnitt basiert zum Teil auf den Veröffentlichungen [74, 75].

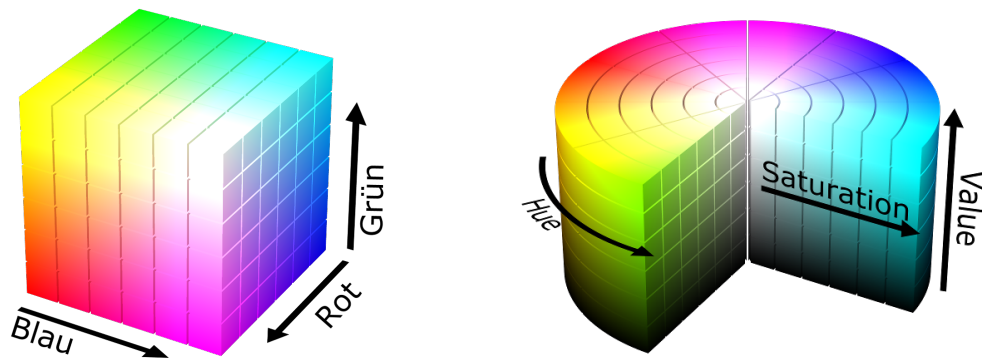


Abbildung 2.5: Der RGB-Farbraum (links) besitzt kartesische Koordinaten nach der Intensität der drei namensgebenden Wellenlängen (rot, grün, blau). Der HSV-Raum (rechts) lässt sich hingegen als Zylinder darstellen: Die Winkelkomponente entspricht dabei der Farbigkeitskomponente, während Radius und Höhe die Sättigung und die Gesamthelligkeit widerspiegeln. [91]

gorithmen zur Verfügung. Diese ist allerdings auch notwendig, da nach wie vor die biologisch intuitiv sehr leichte Verarbeitung nur ungenügend von Rechnern nachgeahmt werden kann.

Ausgangsbasis für eine Bildanalyse ist stets ein optimales Bild hoher Qualität und Schärfe. Innerhalb einer Serie sollten die Aufnahmebedingungen identisch bleiben, um die Vergleichbarkeit möglichst gut zu erhalten. Eine Schlüsselrolle kommt dabei der gleichmäßigen Beleuchtung zu. Ist sie intensiv genug, so kann sie auch Fremdlicht überdecken. Eine spätere Bildverbesserung ist nur im engen Rahmen möglich; abwesende Information kann nicht nachträglich generiert werden.

Digitale Bildaufnahmen werden in aller Regel als gerasterte Helligkeitsinformation behandelt und gespeichert. Farbbilder werden dabei üblicherweise durch Farbfilter in rot, grün und blau aufgenommen, sodass zu jedem Bildpunkt die Helligkeitsinformation in den drei Farbkanälen des RGB-Farbraums vorliegt (siehe Abbildung 2.5, links). Die Farbigkeit entsteht dann durch Unterschiede zwischen den Farbkanälen zum selben Punkt, die wahrgenommene Helligkeit aus der (gewichteten) Kombination. Die digitale Quantisierung beschränkt die Helligkeitsauflösung gängigerweise auf acht Bit, also 256 diskrete Stufen, pro Kanal.

Für Farbbilder haben sich auch andere Farbräume durchsetzen können, also alternativ aufgebaute Beschreibungen des Inhalts der einzelnen Bildpunkte. Der wichtigste ist der ebenfalls dreidimensionale HSV-Farbraum, der den Farbton indiziert sowie Farbsättigung und Helligkeit quantifiziert (englisch: „hue“, „saturation“ und

„value“; siehe Abbildung 2.5, rechts). Die beiden Modelle sind linear ineinander konvertierbar. Der Vorteil des HSV-Raumes ist, dass verschiedene Farbtöne oder Helligkeiten sehr leicht in einem einzigen Kanal unterschieden werden können, während im kamera-nativen RGB-Raum nur Helligkeitsunterschiede in einem einzelnen der drei vorgegebenen Wellenlängenbereiche ersichtlich sind oder aber mit mehreren Kanälen gleichzeitig gerechnet werden muss.

### 2.8.2 Partikelauswertung

Um auf einem Bild Partikel auszuwerten zu können, muss zwischen Partikeln und Hintergrund unterschieden werden. Auch bei idealer Beleuchtung können Farbverläufe des Hintergrunds auftreten und gegebenenfalls die Verarbeitung stören. Um gleichmäßige Änderungen im Bild zu entfernen und schärfer gefasste Kanten hervorzuheben, bewährt sich die Subtraktion des Hintergrundes mittels *Rolling-Ball-Algorithmus*. Dieser ist eine von Sternberg inspirierte Erosion am Graustufenbild [92]: Ein Graustufenbild wird als Höhenkarte interpretiert. Über deren Vorderseite wird eine Kugel gerollt. Der tiefste Punkt, den die Kugel an jeder Stelle erreicht, wird als Hintergrundwert aufgefasst; der Vordergrund ist die Differenz zwischen Original und Hintergrund. Je nachdem, ob helle Vordergrundobjekte vor dunklem Hintergrund oder dunkle Vordergrundobjekte vor hellem Hintergrund liegen, beziehungsweise erwartet werden, rollt die Kugel wie beschrieben auf der Oberseite (heller Vordergrund) über das Profil oder von unten an der Unterseite entlang (dunkler Vordergrund).

Das Vordergrundbild ist noch immer ein Graustufenbild, die Unterscheidung in Partikel und Nicht-Partikel entspricht einem binären Schwarz-Weiß-Bild. Für die hierbei nötige Schwellenwertbildung steht eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung [93, 94]. In der frei verfügbaren Bildauswertesoftware ImageJ wird die IsoData-Methode nach Ridler [95] als Standard vorgeschlagen. Nach dieser liegt der Schwellenwert in der arithmetischen Mitte zwischen der durchschnittlichen Helligkeiten von Vorder- und Hintergrund. Dafür wird das Helligkeits- beziehungsweise Grauwertehistogramm genutzt und iterativ vorgegangen.

Da im Rahmen dieser Arbeit eine hohe Belegungsdichte von Partikeln auf den Bildern keinesfalls auszuschließen ist und die Partikel einzeln und nicht als Agglomerate gewertet werden sollen, erfordert die Bildauswertung einen weiteren Zwischenschritt, der eventuell aneinander liegende Partikeln im Bild voneinander segmentiert. Dazu soll die Implementierung des Wasserscheidealgorithmus in

der Implementierung in ImageJ genutzt werden. Der Wasserscheidealgorithmus nach Vincent [96] wird eigentlich auf Grauwertbilder angewendet, deren Helligkeit wiederum als Höheninformation interpretiert wird. Diese topografische Karte wird dann mit einem ansteigenden Wasserpegel geflutet. Solche Punkte, an denen zwei verschiedene Wasserbecken aneinanderstoßen, gehören zur Wasserscheide. Abschließend werden alle Wasserscheidepunkte und jeweils die Punkte der durch sie vereinzelt Becken zusammengefasst.

Schwarz-Weiß-Bilder können durch einen Kunstgriff dieser Auswertung zugänglich gemacht werden. Dazu werden sie nicht direkt verwendet, sondern ein Zwischenschritt eingefügt, wie auch in der Implementierung in ImageJ: Hier wird vom binären Ausgangsbild die euklidische Distanztransformation durchgeführt, also jeder Bildpunkt durch den Abstand zum nächsten Punkt, der zum Hintergrund gehört, ersetzt. Diese Abstandskarte wird dann noch invertiert. Das Ergebnis dieses Zwischenschrittes ist ein einfarbiger Hintergrund und darauf sichtbaren Schatten der Partikel in abweichenden Grauwerten mit durch lokale Minima gekennzeichneten Zentren.

Die Vermessung der vereinzelt Partikel liefert durch ihre zweidimensionale Darstellung hieraus abgeleitete Kenngrößen. Die offensichtlichste ist die Projektionsfläche; ähnlich einfach ist die Vermessung des Umfanges. Von diesen beiden Größen lässt sich der Wert der Zirkularität ableiten als Produkt vom Quotienten der Fläche und des Umfangsquares mit vier Pi. Sie entspricht also dem Verhältnis des Partikels zu einem umfangsgleichen Kreis und ist auf das Intervall zwischen null (für grade Strecken) und eins (für Kreise) beschränkt. Weitere Kenngrößen können größter und kleinster Feret-Durchmesser der Projektionsfläche sein, also die Länge der größten und der kleinsten eindimensionalen Projektion des Partikelbildes. [39] In die Auswertung der Partikel können bereits vorhandene Informationen einfließen. Im vorliegenden Fall war das verwendete Partikelkollektiv bekannt, somit konnten abgebildete Partikel mit davon abweichender Größe oder Zirkularität beispielsweise ausgeschlossen werden; dadurch werden die Ergebnisse nicht durch Fremdkörper oder Artefakte verfälscht. Das Endergebnis der Bildauswertung ist eine Liste aller erkannter Partikel sowie eine zusammenfassende Statistik.



### 2.8.3 Mustererkennung

#### *Bildauswertung*

In der Weberei ist die Webfehlererkennung ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätskontrolle. Die automatisierte Überwachung wurde durch intensive Forschung vorangetrieben [97, 98]. Ausgangspunkt der Entwicklung waren sehr grob aufgelöste Bilder, auf denen bestimmte Webfehler durch die Beleuchtung eine abweichende Helligkeit aufwiesen. Im Zuge verbesserter digitaler Bildaufnahme und beschleunigter Bildverarbeitung wuchsen die Fähigkeiten [99], sodass heute spezifische Schäden, wie beispielsweise gerissenes Garn, freiliegendes Garn oder Ölflecken individuell erkannt und direkt gegengesteuert werden kann [98].

Auch in anderen Bereichen findet grafische Mustererkennung Anwendung: Videoüberwachung nutzt zeitliche Muster, insbesondere bei der Ganganalyse zum Erkennen gehender Personen [100], Bildkompression versucht Wiederholungen auszumachen [101] und in der Computergrafik werden Texturen aus fast regelmäßigen natürlichen Mustern synthetisiert [102].

#### *Periodizitätserkennung*

Die wichtigste Eigenschaft eines sich wiederholenden Musters ist die Länge seiner Periode. Um sie zu ermitteln wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen. Oh et al. führten jedoch aus [103], dass Fourier-Analyse [104] und Grauwertmatrices [105] unbefriedigende Mittel sein, da sie eindeutige Ergebnisse unter hohem Rechenaufwand nur bei Vorliegen einer größeren Anzahl an Wiederholungen hervorbringen. Dies bestätigten auch Chetverikov und Hanbury [106]: „[Ein Erkennungsfenster] muss einige Perioden der Struktur überspannen“. Selbst wenn es möglich ist, genügend Wiederholungen gemeinsam abzubilden, schlägt auch hier wieder der Rechenaufwand zu Buche. Konventionelle zweidimensionale Autokorrelation bringt zwar zusätzliche Information hervor, wie beispielsweise zweidimensionale Vektoren des Versatzes und die genaue Form des Motivs, allerdings zu erhöhtem Rechenaufwand [101]. Diese Informationen sind sowohl in unserem Ansatz, wie auch zur Überwachung von Filtertüchern jedoch entbehrlich, da die achsenparallele Ausrichtung der Überwachungskamera ohnehin erstrebenswert und überdies leicht umzusetzen ist und von rechteckigen Rapporten im Tuch ausgegangen werden kann.

Oh et al. selbst schlugen eine Vorwärtsdifferenz  $\lambda(\delta)$  der Grauwerte  $g$  eines eindimensionalen Bildes der Größe  $N$  vor, welche die Momente einer Grauwertmatrix ersetzen kann und schneller zu errechnen ist:

$$\lambda(\delta) = \sum_{i=1}^{N-\delta} [g(i) - g(i + \delta)]^2 \quad (2.14)$$

mit der Vorwärtsdistanz  $\delta$  [103]. Asha et al. verbesserten die Methode durch ihre vektorielle Implementierung [107] und erhielten eine einzelne Ergebniszeile  $\Lambda_r$  (beziehungsweise –spalte) für ein zweidimensionales Bild:

$$\Lambda_r(\delta) = \sum_{r=1}^M \left( \sum_{i=1}^N [f(r, i) - f(r, i + \delta)]^2 \right) \quad (2.15)$$

Dabei ist  $M$  die Bildhöhe,  $r$  die Zeile,  $N$  die Breite und  $f$  die Helligkeit des Bildpunktes. Auf ideale, synthetische Bilder angewendet wird der Funktionswert null, wenn die Vorwärtsdistanz  $\delta$  die Periodizität  $p_r$  trifft. Um auch realitätsnahe, mit leichten Unregelmäßigkeiten behaftete Bilder auszuwerten, wendeten Asha et al. die Vorwärtsdifferenzen wiederholt an:

$$\Delta\Lambda_r(d) = \sum_{j=1}^{N-d} [\Lambda_r(j) - \Lambda_r(j + d)]^2 \quad (2.16)$$

Diese weisen eindeutige Minima an den Stellen auf, die der Periodizität und ihren Vielfachen entsprechen.

### *Erkennung von Unregelmäßigkeiten*

In ihrem Übersichtsbeitrag führten Ngan et al. [98] zahlreiche Publikationen auf, die mittels *Gabor-Filter* Defekte beziehungsweise Ausreißer erkennen. Gabor-Filter sind mathematische Integraltransformationen, ähnlich der Fourier-Transformation. Ihr Ergebnis kann *Filterantwort* genannt werden. Im Zeitbereich kann ein Gabor-Filter als um einen Punkt gaußgewichtete Sinuswelle aufgefasst werden [108]. Sein Rechenaufwand kann durch einen Aspekt von Bays et al. *Speeded Up Robust Features* (SURF) [109] reduziert werden: Dort wurden Gaußgewichtungen durch Box-Filter angenähert; diese besitzen als Gewichtungen nur die Werte 0,

$\pm 1$  oder  $+2$  und überdecken rechteckige Flächen (daher „Box“-Filter). Sie können wiederum sehr effektiv über Integralbilder implementiert werden [110, 111]. Nach ihrer einmaligen Erstellung können die Summed-Area-Tables als Lookup-Tabelle zur schnellen Ermittlung des Helligkeitsintegrals eines jeden Rechtecks in der Bildfläche genutzt werden.

Bay et al. gingen auch den nächsten logischen Schritt zur Vereinfachung, indem sie einen Haar-Filter (nach *Alfréd Haar* [112]) einsetzten. Dieser kann aus zwei aufeinanderfolgenden Rechteckfunktionen gleicher Länge und gleichen Betrags gebildet werden, wobei der vorlaufende Teil negativ, der direkt anschließende positiv gewichtet.



## 3 Materialien und Methoden<sup>1</sup>

### 3.1 Weizenmehl und Weizenteig

Mehlpartikel stellen eine typische Verunreinigung in der Bäckerei dar. Ihre Entfernung wurde am Beispiel von Weizenmehl des Typs 550 (gemäß DIN 10355; Rosenmehl der Rosenmühle GmbH, Ergolding) untersucht. Diese Mehlsorte ist ein Standardmehl und von großer kommerzieller Bedeutung für helles Brot und helle Brötchen in Deutschland [64].

Für die Haftkraftversuche mit Mehlpartikeln ist es von Vorteil, möglichst eng gefasste Größenklassen zu verwenden. Aus diesem Grund wurde das Weizenmehl, das natürlicherweise mit einer sehr breiten Partikelgrößenverteilung von etwa 3 bis 200  $\mu\text{m}$  vorliegt, präparativ in mehrere Größenklassen aufgeteilt. Zuerst wurde eine Feinfraktion (kleiner 35-40  $\mu\text{m}$ ) im Windsichter gewonnen. Das Grobkorn dieses Schritts wurde anschließend auf einem Siebturm trocken fraktioniert (Trennschnitte etwa bei 60, 80, 125 und 160  $\mu\text{m}$ ). Die einzelnen Fraktionen wurden dann einzeln im Luftstrahlsieb von anhaftendem Fein- beziehungsweise Feinstgut befreit. Auf diese Weise wurden sechs Fraktionen gewonnen (je nominell <40  $\mu\text{m}$ , 40-60  $\mu\text{m}$ , 60-80  $\mu\text{m}$ , 80-125  $\mu\text{m}$ , 125-160  $\mu\text{m}$ , >160  $\mu\text{m}$ ; siehe auch Abbildung 3.1). Die engeren Fraktionen erlauben die passgenauere Versuchsdurchführung und anschließende Auswertung.

Die Partikelgrößenverteilungskurven wurden mittels Laserbeugung aufgenommen.

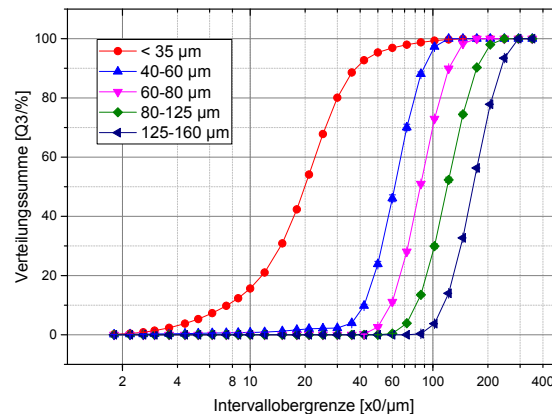


Abbildung 3.1: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Mehlfraktionen.

Dabei werden die vereinzelt Partikel durch die ebene Welle eines aufgeweiteten

<sup>1</sup>Dieses Kapitel basiert in Teilen auf den Veröffentlichungen [2, 3].

Laserstrahls transportiert und das Beugungsmuster hinter einer Sammellinse ausgewertet. Kugelförmige Partikel verursachen konzentrische Beugungsringe; ihre Dichte nimmt mit zunehmender Partikelgröße zu. Auch nicht kugelförmige Partikel können nach dieser Methode vermessen werden. Dispergiert wurde dabei im Druckluftstrahl (System Rodos), vermessen mit dem Instrument Helos (beide der Sympatec GmbH, Clauthal-Zellerfeld).

Weizenmehlpartikel stellen an die klassische Haftkraftmessung einige Herausforderungen. Größe und Form der Mehlpartikel korrelieren nicht mit Größe und Geometrie ihrer Kontaktzone, wie es bei den wohldefinierten Körpern der Kugel-Platte-Versuche der Fall ist. Dort resultiert die Kontaktzone aus den anliegenden Partikelformen, der Unterlage und gegebenenfalls einer Modifikation durch eine gewisse Rauheit. Im Fall von Weizenmehlpartikeln nehmen wir an, dass herausstehende Stärkekörner die Trägeroberfläche berühren. Deren Größe ist stochastisch verteilt und (bei den von uns verwendeten Partikelgrößenfraktionen) unabhängig von der Größe der Mehlpartikel, ihrer zufälligen Form und ihres unregelmäßigen Seitenverhältnisses.

Alle Mehlfraktionen zeigten den typischen Partikelbau aus kontinuierlicher Matrix mit eingebetteten Stärkekörnchen (siehe Abbildung 2.1). Einzig die feinste Fraktion unterschied sich wesentlich: sie bestand aus Bruchstücken, die teilweise keine oder nur sehr wenige Stärkekörnchen an ihrer Oberfläche zeigten, dafür aber häufig sehr spitzwinklig und kantig wirkten. Bei anderen Feinpartikeln wiederum handelte es sich nur um vereinzelte Stärkekörner ohne Proteinmatrix. Das Verhalten dieser Feinstfraktion dürfte sich deshalb deutlich von dem der anderen Fraktionen unterscheiden.

## 3.2 Gärtücher, Förderbänder und weitere Substrate

Bei der Herstellung von Brötchen gibt es Berührungen mit einigen verschiedenen Oberflächen und Materialien. Die meisten Apparate sind aus rostfreiem Edelstahl gefertigt und mindestens ein Prozessschritt beinhaltet den Kontakt zwischen den ungebäckenen Teiglingen und einer textilen Oberfläche, aber auch andere Oberflächen sind bei der Teigformung und beim Transport üblich. Deshalb beschäftigt sich diese Arbeit nicht nur mit Edelstahlblechen unterschiedlicher Rauheit, sondern neben kommerziellen Gärtüchern auch mit verfügbaren Förderbandmaterialien, die

in der Lebensmittelindustrie und der Bäckerei vorkommen.

### 3.2.1 Feste Oberflächen

Um die Vergleichbarkeit zu anderen Arbeiten zu schaffen, wurden als Modelloberflächen rostfreie Edelstahlbleche der Stahlsorte 1.4016 (X6Cr17; AISI 430) eingesetzt. Sowohl die ursprüngliche, kaltgewalzte Oberfläche wurde genutzt, als auch aufgeraute Proben, die mit sechs verschiedenen Körnungen an Schmirgelpapier von 400 bis 60 vorbereitet wurden. Die gleichartige Form der Schleifmittel ruft eine klassische Selbstähnlichkeit an den Blechoberflächen hervor (siehe auch Abbildung 3.2). Der wesentliche Unterschied zwischen ihnen ist die Tiefe ihrer größten Furchen und Unebenheiten, die sehr schlicht mit Rauheit beschrieben werden können. Um die weitere Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten zu schaffen, wurden die Blechoberflächen durch ihre quadratische Rauheit  $S_q$  (auch: *RMS-Rauheit*) charakterisiert. Die Werte betragen  $0,05 \mu\text{m}$  an der kaltgewalzten Oberfläche beziehungsweise reichten von  $0,3$  bis  $5 \mu\text{m}$  an den geschmirgelten Blechen. Da in dieser Arbeit einige Gärtücher aus „Polyester“ (wie zumeist, so auch in die-

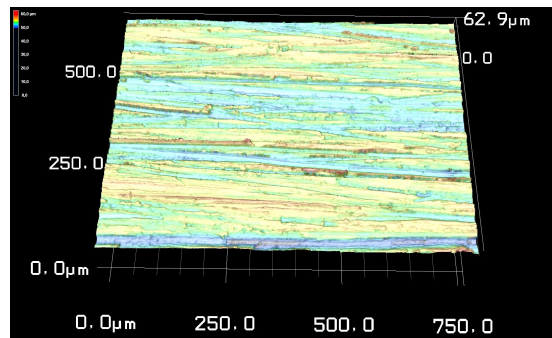


Abbildung 3.2: Geschmirgeltes Edelstahlblech.

sem Fall Polyethylenterephthalat, PET) verwendet werden sollten, wurde zum Vergleich auch massives PET-Substrat eingesetzt. Das weiche Material erhielt auch beim Schmirgeln mit feinem Schleifpapier sehr raue Oberflächen. Dadurch konnte nur der obere Rauheitsbereich vom Edelstahlblech mit PET-Substrat verglichen werden.

Zusätzlich wurden neun verschiedene Förderbänder in Bezug auf ihre Teighaftung untersucht (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Verwendete Förderbandmaterialien

Bezeichnung	Beschichtung	Textur	Sq [ $\mu\text{m}$ ]
FAW-5E	TPU	Waffel	157
WVT-219	TPU	Sägezahnprofil	214
FNB-5EIC	TPU	Glatt	2,13
EMB-12EMCH	TPU	Matt	3,00
FSB-2EIC	TPU	Glatt & glänzend	3,06
FAB-8EOCV	PVC	Matt	3,26
FAW-8EOCV	PVC	Waffel	182
CNW-5E	TPO	Waffel	156
CNB-6EBC-A1	TPO	Glatt & matt	2,91

### 3.2.2 Gewebte Tücher

Kommerzielle Gärtücher aus Baumwolle oder Polyester wurden genutzt verwendet. Die meisten waren in Leinwandbindung gewebt, zwei in Rips. Nähere Details listen Tabellen 3.2 und 3.3 auf, die Parameter werden in Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Alle Tücher wurden vom Lehrstuhl BGT am TUM-WZW ausgesucht und zur Verfügung gestellt.

Ihren praktischen Einsatz finden Gärtücher in der Bäckerei, wenn Teiglinge zum

Tabelle 3.2: Verwendete Baumwolltücher. *Leinw.* – Leinwandbindung. Die Parameter werden in Abschnitt 3.3.1 beschrieben.

Tuch		57G	57X	559	50X	20-00	20-01	97-29	97-31	98-71
Hersteller		Sattler	Sattler	Sattler	Sattler	ITT	ITT	NW	NW	NW
Bindung		Leinw.	Leinw.	Leinw.	Leinw.			Rips	Rips	Leinw.
gekrumpft		doppelt	ja	ja	doppelt			doppelt	doppelt	doppelt
Kreuzungen	$\text{cm}^{-2}$	227	345	326	390			360	240	119
Sq	$\mu\text{m}$	104	60	61	63	102	56	68	72	97
Spk	$\mu\text{m}$	148	75	45	114	223	35	119	34	78
Sk	$\mu\text{m}$	218	152	151	145	192	157	171	183	258
Svk	$\mu\text{m}$	122	55	69	28	42	42	58	82	92
- Profiltiefe	$\mu\text{m}$	488	281	266	287	457	234	348	298	428
Sxp	$\mu\text{m}$	201	121	103	121	292	99	149	105	145
Spitzenanteil	%	7,5	7,7	9,4	8,7	14,3	7,3	6,9	4,6	4,8
Kernanteil	%	75,6	81,4	78,5	83,9	80,0	83,6	83,7	80,3	82,1
Talanteil	%	16,9	10,9	12,0	7,4	5,7	9,1	9,4	15,1	13,0

Gehenlassen im Gärschrank auf ihnen liegen, dem letzten Verfahrensschritt, bevor sie zum Backen auf ein Backblech überführt werden. Der Teig wird zu Teiglingen



Tabelle 3.3: Weitere verwendete Gärtücher. *Leinw.* – Leinwandbindung. Die Parameter werden in Abschnitt 3.3.1 beschrieben

Tuch		95-99	13-00	13-01	95-12	96-03	96-74	97-06
Hersteller		NW	ITT	ITT	NW	NW	NW	NW
Material		67 % PES, 33 % BW	PES	PES	PES	PES	PES	PES
Bindung		Leinw.		Rips	Leinw.	Rips	Leinw.	Leinw.
thermofixiert		ja			roh	ja	ja	ja
Kreuzungsdichte	cm <sup>-2</sup>	468	253	255	207	450	255	268
Sq	µm	64	71	77	92	77	53	54
Spk	µm	136	114	212	51	178	48	55
Sk	µm	128	124	151	224	148	135	118
Svk	µm	57	95	72	100	55	32	66
- Profiltiefe	µm	321	333	434	375	381	214	239
Sxp	µm	127	135	231	142	171	91	98
Spitzenanteil	%	8,2	8,3	7,1	9,8	9,0	13,5	12,2
Kernanteil	%	78,5	67,7	79,2	76,6	79,8	78,4	75,1
Talanteil	%	13,3	24,0	13,7	13,6	11,1	8,1	12,7

geformt und verkehrt herum auf die Tücher gelegt, um bei hoher Luftfeuchtigkeit und Wärme im Gärschrank gehen zu können. Nach dem Gehen werden die Teiglinge abgekippt, sodass sie von selbst auf das Backblech fallen. Die Tücher müssen dabei zwei Aufgaben erfüllen: Während des Gehens muss die Ansammlung von Feuchtigkeit verhindert werden, deshalb müssen sie luft- und dampfdurchlässig sein; zum Abkippen im Erdschwerefeld müssen sich die Teiglinge schnell und vollständig vom Gärtuch lösen.

Eine große Herausforderung stellt es für die Tücher dar, wenn Partikel ins Spiel kommen: Um die Teigablösung zu erleichtern, wird in mehreren Herstellungsstufen Streumehl als Trennmittel eingesetzt. Überschüssiges Mehl verteilt sich und haftet an Apparaten und verschmutzt Oberflächen, insbesondere die porösen, oberflächenreichen Gärtücher.

Herausforderungen bei der Untersuchung zeigten sich wegen des geringen optischen Kontrasts zwischen den zumeist weißen Tüchern und dem weißen Mehl. Bei den sauberen Tüchern ließ sich mittels konfokaler Laser-Raster-Mikroskopie (CLSM) Abhilfe schaffen. Partikelerkennung und -auswertung mussten jedoch neu entwickelt werden im Vergleich zu anderen Arbeiten [52, 53, 55–57, 113, 114]: Ungefärbte Partikel sind auf den Tüchern praktisch unsichtbar, insbesondere während der Haftkraftversuche. Deshalb wurden sie aufgefangen und nach den Experimenten ausgewertet, da die angewandte Färbung sicherlich die Haftkräfte beeinflusst.

## 3.3 Messung von Oberflächeneigenschaften

### 3.3.1 CLSM, Auswertung nach ISO 25178-2

Um die Substratoberflächen charakterisieren zu können und um Parameter zur Korrelation mit dem Haftverhalten zu gewinnen, wurden sie mit einem konfokalen Laser-Raster-Mikroskop aufgenommen (CLSM; VK-X110, Keyence Corporation; 50-fach-Objektiv). Bei den Blechen und den Förderbandmaterialien betrug der Bildausschnitt mindestens 750 mal 550  $\mu\text{m}$ , für die Tücher und die texturierten Förderbänder waren die Bildausschnitte groß genug, um sie anschließend auf ihre Texturmotive beschneiden zu können; dies entsprach Rechtecken von etwa 0,9 bis 1,4 mm. Die Aufnahmen der Bleche und Förderbänder wurden einer automatischen Neigungskorrektur unterzogen und dann nach ihrer Rauheit  $R_q$  (beziehungsweise  $S_q$ ) ausgewertet. Dieser Parameter besticht durch seine Einfachheit, zum Teil hohe Aussagekraft und vor allem durch seine weite Verbreitung. Zum Vergleich der Bleche ist diese Größe tatsächlich wertvoll, da ihre Oberflächenprofilinien selbstähnlich sind und die verschiedenen Bleche sich durch das Schmirgeln analog verhalten.

Da die Oberflächenstruktur der Tücher auf unterschiedlichen Größenskalen unabhängig beeinflusst werden kann, bedarf es zu ihrem Vergleich feiner ausgearbeiteter Parameter, die nicht auf Selbstähnlichkeit basieren. Solche können in der Norm ISO 25178-2 gefunden werden. Sie segmentiert ein Oberflächenprofil in drei Bereiche – Spitzen, Kern und Täler – und beschreibt zugehörige Oberflächenanteile und charakteristische Höhen. Im Mittelpunkt der Auswertung steht die *Verteilungskurve des flächenhaften Materialanteils*. Sie beschreibt, in welcher Höhe einer gedachten Ebene parallel zur mittleren Ebene der flachen Oberfläche wieviel Material vorhanden ist: In der Höhe der größten Profilsitzen sind nur sie und damit sehr wenig Material vorhanden, in einer mittleren Höhe deutlich mehr. In der niedrigen Höhe der tieferen Täler ist entsprechend viel Material zu finden. Die Verteilungskurve erhält man also, wenn die Profilhöhe über ihrer kumulierten Häufigkeit aufgetragen wird (siehe Abbildung 3.3, rechts, fette Kurve).

Den zentral gelegenen Bereich des *Kerns* erhält man bei Extrapolation der flachsten Region in der Verteilungskurve des flächenhaften Materialanteils: Die flachste Sekante, die sich über 40 % Materialanteil aufspannt, überstreicht den Höhenbereich des Profilkerns  $S_k$ , wenn sie auf 0 bis 100 % Materialanteil verlängert wird. Der Materialanteil, anschaulich der Oberflächenanteil der senkrechten Pro-

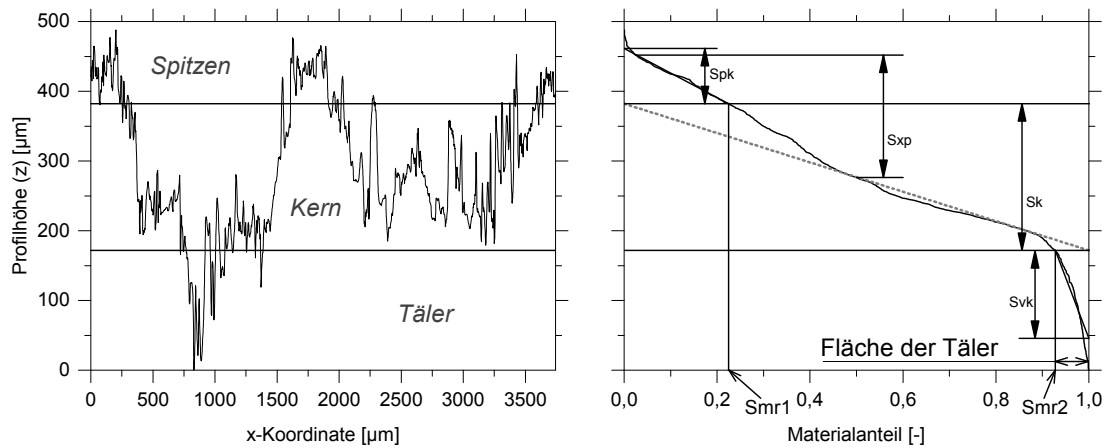


Abbildung 3.3: Schema zu den Oberflächenparametern aus ISO 25178-2: Links ist eine beispielhafte Oberflächenmesskurve dargestellt. Im rechten Diagramm ist ihre kumulierte Höhenverteilung aufgetragen. Ihre flachste Sekante über 40 % Materialanteil ist gestrichelt eingezeichnet; ihr Höhenbereich  $S_k$  definiert den Kernbereich des Oberflächenprofils und ist von hier aus in das linke Diagramm übertragen. Darüber liegen die Spitzen, darunter die Täler. Die Grenze erreicht die Materialanteilskurve an den beiden Stellen  $S_{mr1}$  und  $S_{mr2}$ . Die *reduzierte Spitzenhöhe*  $S_{pk}$  ergibt sich, wenn das Integral zwischen der Materialanteilskurve und der oberen Grenze des Kernbereichs zum Dreieck linearisiert wird (wie angedeutet). Dies gilt für die *reduzierte Taltiefe*  $S_{vk}$  entsprechend. Die *maximale Spitzenhöhe*  $S_{xp}$  liest sich als Höhendifferenz zwischen den Stellen 2,5 % und 50 % der Materialverteilungskurve ab.

jektion der Oberfläche, ergibt sich als die Differenz (in der Norm ohne eigenes Formelzeichen) der Materialanteile der Verteilungskurve an der oberen und unteren Begrenzungshöhe des Kernbereichs ( $S_{mr1}$  und  $S_{mr2}$ ).

Die charakteristischen Höhen von Spitzen- und Talbereich werden als „reduzierte“ Werte angegeben; sie sind weniger empfindlich gegenüber extremen Ausreißern. Die reduzierten Spitzenhöhen  $S_{pk}$  und Taltiefen  $S_{vk}$  ergeben sich aus der Linearisierung des oberhalb beziehungsweise des unterhalb des Kernbereiches liegenden Materials. Dafür wird das Flächenintegral zwischen Verteilungskurve und der den anliegenden Kern begrenzenden Höhe durch den jeweiligen Materialanteil ( $S_{mr1}$  oder die Differenz von eins und  $S_{mr2}$ ) geteilt. Diese reduzierten Höhen sind gegenüber Ausreißern in den Messwerten und außergewöhnlichen Stellen an der Oberfläche weniger empfindlich. Die Oberflächenanteile von Spitzen ( $S_{mr1}$ ) und Tälern (in der Nomenklatur der Norm die Differenz von eins und  $S_{mr2}$ ) können an der ursprünglichen Kurve des flächenhaften Materialanteils an der Ober- und

Unterkante des Kerns abgetragen werden (siehe Abbildung 3.3, rechts).

Von allen in der Norm ISO 25178-2 beschriebenen Parametern wurden die drei (reduzierten) Höhen, die drei Materialanteile, sowie der Extremwert der Spitzenhöhen  $S_{xp}$  verwendet, der sich als Höhenunterschied in der Verteilungskurve des flächenhaften Materialanteils zwischen 2,5 und 50 % ergibt (siehe Abbildung 3.3, rechts). Zwischen diesen Werten besteht bei den Textilien keine Korrelation, auch keine Kreuzkorrelation zu den Herstellerangaben der Gärtücher. Das bedeutet, dass diese Auswertung aus den umfassenden Oberflächenvermessungen tatsächlich neue greifbare Information formt.

### 3.3.2 Oberflächenenergien (extern ermittelt)

Die Oberflächenenergien und ihre Zusammensetzung durch disperse und polare Anteile wurden von Frau Dipl.-Ing. Rita Laukemper an der TU München gemessen. Diese Daten wird sie selbst in anstehenden Veröffentlichungen nutzen.

## 3.4 Messung der Haftkräfte mittels Zentrifugenmethode

In der Literatur werden drei verschiedene Methoden zur Haftkraftmessung beschrieben. Das Raster-Kraft-Mikroskop (AFM, atomic force microscope) kann einzelne Kräfte hochaufgelöst detektieren. An die Biegefeder seiner Messspitze kann ein einzelnes Mehlpartikel geklebt werden, das man anschließend in seiner durch das Ankleben vorbestimmten Orientierung an einen bestimmten Ort des zu untersuchenden Substrates drückt und wieder abzieht. Ob sich ein unregelmäßig geformtes Mehlpartikel tatsächlich in dieser zufällig angenommenen Orientierung auf der Oberfläche absetzt, ist nicht gewährleistet. Deshalb ist diese Anwendung sinnvollerweise auf wohldefinierte Geometrien beschränkt. Trotz der hohen Präzision des Messprinzips kommt es zudem zu sehr großen Messunregelmäßigkeiten, die nicht selten das Ausmaß des eigentlichen Werts erreichen.

In dieser Arbeit bildet die Zentrifugenmethode das Herzstück der Haftkraftmessung. Die zugrundeliegende Theorie verknüpft die Haftkraft eines Partikel-Substrat-Kontaktes mit der wirkenden Trägheitskraft auf das Partikel in einem Zentrifugalfeld.

Im hier genutzten Versuchsaufbau kam ein LUMiSizer (LUM GmbH Berlin) zum Einsatz, der eine Kühlzentrifuge mit einer dem Radius nach orts aufgelösten optischen Transmissionsmessung vereint. In Kombination mit den am Lehrstuhl kon-



Abbildung 3.4: Küvetten und Adapter

struierten Küvetteneinsätzen mit durchsichtigen Seitenwänden ist es möglich, eine Teigprobe im Zentrifugalfeld zu beobachten, wie sie sich deformiert und von ihrem Untergrund ablöst. Ähnliche selbstkonstruierte Einsätze hatten sich in Vorgängerarbeiten bewährt [59, 60, 81, 82, 115, 116]. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Einsätze folgen zwei Mustern: Einsätze für Haftkraftversuche von Mehlpartikeln nehmen das Substrat auf und halten die leicht deformierbaren Tücher auf der Innenseite; mit definiertem Abstand ist auf der Außenseite ein Auffangfenster aus transparentem Klebestreifen auf einem Einschub angeordnet. Der Klebefilm ist zum Substrat hin gerichtet, die abgelösten Partikel werden auf ihn geschleudert und dort fixiert. Der Einschub ist leicht austauschbar, sodass er zwischen den einzelnen Drehzahlstufen einfach gegen einen neuen, unbeladenen gewechselt werden kann. Die Küvetteneinsätze für die Haftversuche mit Teig besitzen zwei transparente Fenster, so ist der Haftversuchsaufbau der Transmissionsmessung der Zentrifuge zugänglich. Dadurch kann die Haftpaarung einmal in der Küvette montiert und in ihr eingeschlossen werden, ohne dass zwischen den einzelnen Drehzahlstufen eine Öffnung nötig ist (siehe Abbildung 3.4).

### 3.4.1 Mehlpartikel

Für die Haftkraftversuche wurden Mehlpartikel einer engen Partikelgrößenverteilung (siehe Abschnitt 3.1) sanft mit einem Spatel durch ein feines Sieb (400  $\mu\text{m}$ , Metallfolie) auf das zu untersuchende Substrat gestreut. Die Haftpaarung wurde in am MVM selbstgebaute Küvetten und Adapter montiert und zentrifugiert

(siehe Abbildung 3.4). Bei den Versuchen mit trockenen Partikeln betrug die Luftfeuchtigkeit  $50 \pm 5 \%$  bei  $18\text{--}23^\circ\text{C}$ . Bei diesen Bedingungen sollte keine relevante Kapillarkondensation auftreten [117]; You und Wan fanden dies noch bei  $85 \%$  rel. Feuchte [118].

Ein anfängliches Anpressen fand bei einer relativen Zentrifugalbeschleunigung von 280 statt. Dies vereinheitlicht die Ausgangsbedingungen und sorgt für ein gleichmäßigeres späteres Ablösen mit geringerer Streubreite; das Vorgehen ist dabei durch Knoll et al. [59] inspiriert. Dann wurde die Küvette umgedreht, sodass die Haftpaarung nach außen zeigte und sich die Partikel mit der gerichteten Beschleunigung ablösen konnten.

Aufgrund des sehr geringen optischen Kontrasts zwischen den unregelmäßigen weißen Mehlpartikeln und den flauschigen weißen Gärtüchern konnten Bilder ungefärbter Partikeln auf den Tüchern nicht wie sonst in der Literatur üblich ausgewertet werden. Deshalb wurden nicht die verbliebenen Partikel auf dem Substrat betrachtet, sondern die abgelösten Partikel bei jeder Drehzahlstufe für die spätere Analyse auf klarem Klebestreifen aufgefangen.

In vierzehn ansteigenden Stufen wurde die Drehzahl von 500 bis 4000 Umdrehungen pro Minute erhöht und die Partikel abgeschleudert und je Stufe aufgefangen. Der Radius der Zentrifugalbahn betrug dabei 110 mm. Auf den Klebestreifen wurden die Partikel sofort beim Auftreffen fixiert und legten sich nicht flach in die günstigste stabile Lage; das ergab als positiven Nebeneffekt ein repräsentativeres Bild der Partikelgrößenverteilung.

Es ist anzunehmen, dass die Haftkraft der Zentrifugalkraft entspricht, bei der die Ablösung stattfindet. Damit ist die Messgenauigkeit eng mit der Weite der Drehzahlstufen verknüpft. Andere Studien waren hier weniger differenziert und verwendeten beispielsweise nur fünf bis sieben [118], beziehungsweise acht Stufen [52, 119–122].

Das aufgefangene Mehl wurde selektiv gefärbt, hierzu bewährte sich eine angepasste Jod-Stärke-Probe: Eine Iod-Kaliumiodidlösung wird mit Ethanol versetzt, sodass sie das gesamte Gärtuch beziehungsweise die Unterlage benetzt, und weiter verdünnt, damit die Eigenfarbe das Gärtuch nicht mehr färbt. So ließ sich ein hoher Kontrast zwischen Mehl und Tuch erreichen.

Diese Färbung eignet sich auch sehr gut für das aufgefangene Mehl, das auf dem Klebefilm liegt. Hier erlaubt es die Unterscheidung zwischen Mehlpartikeln und übrigem Staub, Fasern und Imperfektionen am Klebefilm, die sonst nicht sinnvoll

vermieden werden können. Die gefärbten Partikel wurden der Bildaufnahme und Auswertung gemäß Abschnitt 3.6.1 weiterverwendet.

### 3.4.2 Teigproben

Ein einfacher Modellteig wurde aus dem gleichen Weizenmehl wie zuvor (Rosenmehl, Typ 550) und vollentsalztem Wasser zu einer Teigausbeute von 160 hergestellt. Dafür wurden 10 g Mehl mit 6 g Wasser vermischt und verknetet und für Experimente mit den festen Oberflächen, sowie neuen Tüchern und verschiedentlich gealterten Tüchern verwendet. Bei den künstlich gealterten Tüchern wurde mit einer Teigausbeute von 170 (aus 10 g Mehl und 7 g Wasser) verfahren. Der Teig wurde vor den Versuchen in eine handelsübliche Injektionsspritze gefüllt, wodurch er auch vor dem Austrocknen geschützt war.

Die Probenherstellung erfolgte in enger Anlehnung an Chen und Hosoney [62], wobei die Teigextrusion am Texture Analyzer (TA-XT2, Stable Micro Systems Ltd., Godalming) nachempfunden wurde. Der Teig wurde aus der Spritze in einen dünnen Strang auf eine leichte Kunststoffolie gepresst, mittels Rasierklinge abgeschnitten und dann die frische Oberfläche auf die gewünschte Unterlage gesetzt (siehe auch Abbildung 3.5). Mit dem Eigengewicht eines 50 mm langen PVC-Stabs wurde die Teigprobe fixiert, damit sie sich nicht während des weiteren Einbaus ungewollt löst. Die gesamte Versuchsvorbereitung erfolgte in einer Klimakammer unter erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit von  $85 \pm 10 \%$ , um dem Antrocknen und einer oberflächlichen Verhautung vorzubeugen. Bei diesen Versuchen kam kein Streumehl zur Anwendung.

Die kleine Teigprobe wird auf der zu untersuchenden Oberfläche in der transparen-

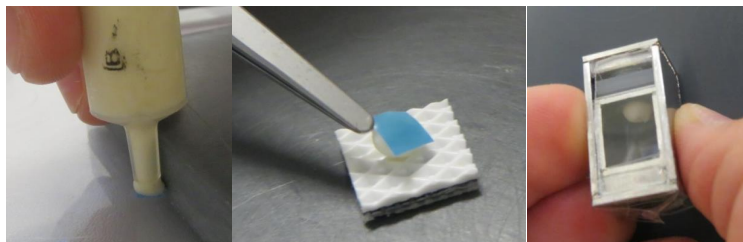


Abbildung 3.5: Versuchsvorbereitung mit Teig: Der Teig wird auf ein kleines Stück Folie extrudiert und abgeschnitten (links). Die Teigprobe wird auf das zu untersuchende Substrat transferiert (mitte). Die Haftpaarung ist in der durchsichtigen Küvette für Teigversuche montiert (rechts).

ten Küvette montiert. Ein kurzes Anpressen des Teiges in der Zentrifuge bei einer relativen Zentrifugalbeschleunigung von 19 für 1 Minute bewirkte einen vergleichbaren Kontaktdruck an der Kontaktfläche wie bei einem technologisch relevanten Teigling in praktischer Originalgröße. Die Kontaktfläche war meist näherungsweise rund und wurde daher als Ellipse angenommen und über die zwei zugehörigen Halbachsen vermessen. Ein Messschieber eignete sich hierfür in gleicher Weise wie die deutlich aufwändigere mikroskopische Vermessung des angefärbten Abdrucks auf dem Substrat.

Durch die transparenten Küvetten konnte mit der optischen Transmissionseinheit der Schattenwurf der Teigprobe beobachtet und zusammen mit der Zentrifugationsgeschwindigkeit aufgezeichnet werden. Die Position des Schattens gibt Aufschluss darüber, ob die Teigprobe noch am Haftpartner haftet oder sich bereits gelöst hat. Außerdem sich mit seiner Hilfe der Bahnradius ermitteln, der etwa 105 mm betrug. Mit dem regelbaren Drehzahlbereich der Zentrifuge von 200 bis 4000 Umdrehungen pro Minute ließ sich so eine relative Zentrifugalbeschleunigung von 4,7 bis 1880 darstellen.

Die Zentrifugation ruft in der Teigprobe eine Kraft hervor statt sie wegbestimmt

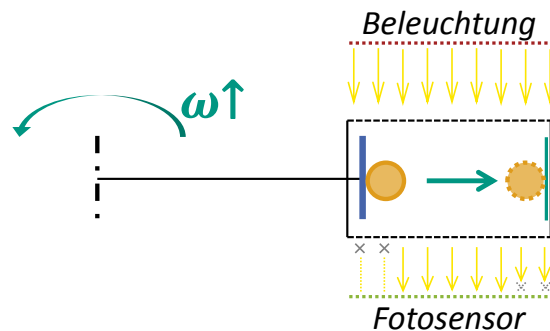


Abbildung 3.6: Funktionsschema der LumiFuge: Der Schattenwurf der Teigprobe wird aufgenommen. Löst sich der Teig, verschiebt sich sein Schatten.

über einen vorgegebenen Verfahrensweg zu deformieren, wie es der Texture Analyzer tut [62]. Daraus resultieren praktisch relevante Scherraten am Teig und es wird besser ersichtlich, wie lange der Teig zum Ablösen braucht.

Die Haftpaarung wurde in ansteigenden Drehzahlstufen zentrifugiert bis sich der Teig löste. Aus Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und Bahnradius  $r_Z$  ergibt sich die Zentrifugalbeschleunigung; ausgewertet wurde die übertragene Zugspannung  $\sigma_Z$  bei der Ablösung:



$$\sigma_Z = \frac{F_A}{A_K} = \frac{m \cdot r_Z \cdot \omega^2}{\pi/4 \cdot d_1 \cdot d_2} \quad (3.1)$$

mit der Haftkraft  $F$ , der Kontaktfläche  $A_K$ , der Teiglingsmasse  $m$  und den beiden Halbachsen der ellipsoidalen Kontaktfläche  $d_1$  und  $d_2$ .

Die Ergebnisse werden mit ihrem Mittelwert und ihrem Streubereich in Höhe von einer Standardabweichung angegeben. Während bei Haftkraftversuchen die Streubreiten den doppelten Betrag des Mittelwerts annehmen können [55, 56, 58, 113], gelang es hier, die relative Standardabweichung auf im Mittel 20 % zu reduzieren (44 % bei den praktisch gebrauchten Tüchern).

## 3.5 Alterung von Gärtüchern

### 3.5.1 Gebrauch

Drei verschiedene Alterungsmethoden wurden untersucht (siehe auch Tabelle 3.4): Die Gärtücher unterlagen praktischem Gebrauch in einer mittelständischen Bäckerei. Die Tücher wurden auf Dielen aus Buchenholz gezogen und bei der Herstellung von schlichten weißen, gestüpfelten Kaiserbrötchen eingesetzt. Dabei wurden täglich zwei Chargen an sieben Tagen in der Woche produziert. Im Gärschrank herrschten 30°C und 90 % relative Luftfeuchtigkeit. Die Tücher waren pausenlos im Einsatz. Proben wurden alle zwei Wochen, bis zur Höchstdauer von zwölf Wochen, entnommen.

### 3.5.2 Waschen

An der TU München wurden die Gärtücher gewaschen. Ein handelsübliches Vollwaschmittel (mit >30 % Zeolithen, 15-30 % Bleichmittel auf Sauerstoffbasis, 5-15 % anionischen Tensiden, <5 % Polycarboxylaten, nichtionischen Tensiden, Phosphonaten, Enzymen, optischen Aufhellern, Duftstoffen) und ein Vollwaschprogramm bei 60°C wurden eingesetzt. Geschleudert wurde bei 1100 Umdrehungen pro Minute, getrocknet an der Luft hängend. In der Praxis werden Gärtücher planmäßig gewaschen, um anhaftende und eingelagerte Verunreinigungen zu entfernen und eine gründliche Hygiene zu schaffen.

### 3.5.3 Bürsten

Es wurde am MVM eine Bürstapparat aufgebaut (siehe Abbildung 3.7). Im Kern bestand sie aus einem KBL 120 der August Mink KG, Göppingen mit 29 Bürstkörpern (76 mm Länge; Borsten aus PA6, 0,2 mal 25 mm). Eine Tuchprobe wurde auf dem geerdeten Tisch unter den Bürsten eingespannt und für eine definierte Zahl an Bürstgängen bearbeitet. Diese Zahl entsprach einem zwar hypothetischen, aber am Alltag orientierten Einsatz, bei dem das Tuch dreimal täglich mit jeweils 5 Zügen abgebürstet wird, um dort Anhaftungen zu entfernen. Die Probeintervalle entsprachen damit Dreimonatsschritten bis zum Äquivalent von einem Jahr. Händisches Bürsten stammt als leichter Zwischeneingriff aus der handwerklichen Backstube, kann aber auch in technisierteren Betrieben beispielsweise da besonders leicht eingerichtet werden, wo Tücher ohnehin automatisiert bewegt werden. Hier kann eine stationäre Bürste oder angetriebene Bürstwalze an die vorbeigeförderte Oberfläche geführt werden.

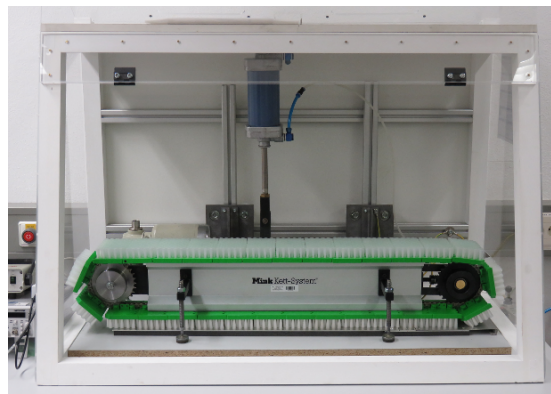


Abbildung 3.7: Der eingesetzte Bürstapparat: 29 Bürstkörper laufen an einer Kette um. Zu behandelnde Tücher werden auf der geerdeten Halterung (Blech unterhalb) montiert.

Tabelle 3.4: Alterungsmethoden an den Gärtüchern, ihre Intensität und deren Equivalent im praktischen Einsatz.

Methoden	Intensität	Entspricht
Praktischer Gebrauch	2 – 12 Wochen	
Bürsten	0, 47, 93, 140, 187 Umläufe	bis 52 Wochen
Vollwäsche und Trocknen	1, 5, 10 Waschgänge	bis zu 60 Wochen

## 3.6 Bildanalytik

### 3.6.1 Partikelerkennung

Die aufgefangenen Mehlpartikel wurden mit einer verdünnten Lugol'schen Lösung gefärbt (1:11 in Ethanol/Wasser 50 % [V/V], mit schließlich 0,3 g/l Iod und 0,6 g/l Kaliumiodid). Iod und Iodid der Lösung rufen an den Mehlpartikeln die schwarz-violette Iod-Stärke-Reaktion oder –Färbung hervor. Die Verdünnung senkt die Konzentration, sodass das Iod keine weiteren deutlichen Farbänderungen hervorruft. Die volumengleiche Ethanol-Wasser-Mischung zur Verdünnung sorgt für eine gute Benetzung aller Oberflächen, der Alkoholanteil auch für das schnelle Trocknen, während der Wasseranteil für die Farbreaktion essenziell ist. Danach zeigten sich die Mehlpartikel sehr deutlich und unterschieden sich von allen übrigen Verunreinigungen auf dem Klebefilm, wie Fremdpartikeln, Bruchfasern und Blasen und Imperfektionen im Klebefilm.

Die gefärbten Partikel wurden mit einer Mikroskopkamera aufgenommen (DI-Li, 2011-9; Distelkamp-Electronic, Kaiserslautern). Im Aufsicht zeigte sich die Färbung, im Durchlicht schärften sich die Kanten. Die Bildverarbeitung und –auswertung erfolgte mit ImageJ (Versionen ab 1.37): Auf- und Durchlichtansichten wurden kombiniert, Mehlpartikel erkannt, gezählt und ausgewertet (siehe Abbildung 3.8).

Die Datenaufbereitung folgte einem neuartigen Vorgehen. Da die Haftkräfte unregelmäßig geformter Partikel sehr weit streuen [56, 113], erscheinen die mittleren Beträge weniger relevant, als die zur vollständigen Abreinigung tatsächlich benötigte Beschleunigung. Dieses Vorgehen hat überdies einen großen Vorteil bei unvollständig dispergierten Partikeln. Das Ablöseverhalten zeigt einen typischen Verlauf mit steigender Drehzahl: Bei geringen bis mäßigen Geschwindigkeiten lösen sich sehr viele Partikel, anschließend nimmt die Anzahl mit steigender Dreh-

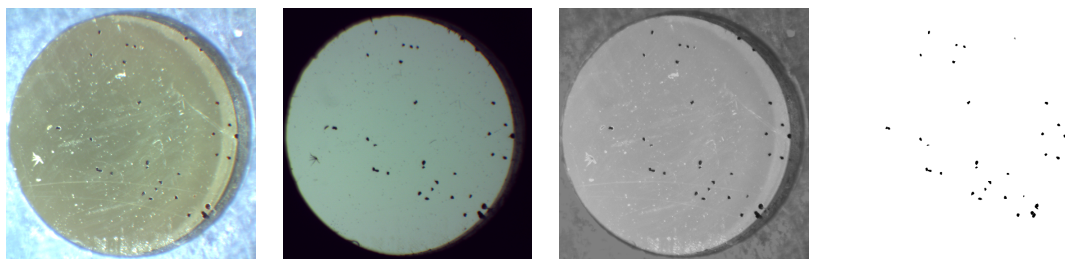


Abbildung 3.8: Bildauswertung der aufgefangenen Mehlpartikel: Auflichtbild (1. von links) und Durchlichtbild (2. von links) werden überlagert (3. von links). Dadurch werden Fremdpartikel ausgeschlossen (ovale Hervorhebung). Aus dem Schwarz-Weiß-Bild werden anschließend die vereinzelt Mehlpartikel ausgezählt (rechts).

zahl gleichmäßig ab. Dies ist vermutlich einer unvollständigen Vereinzelung der Mehlpartikel und einer mehrlagigen Belegung der Oberfläche zuzuschreiben. Nach der Entfernung von Agglomeraten oder den oberen Partikellagen liegen allerdings nur noch Kontakte zwischen Einzelpartikeln und der Substratoberfläche vor. Die gleichmäßige Abnahme der Anzahl der aufgefangenen Partikel kann bis zu ihrem Nullwert bei einer bestimmten Drehzahl extrapoliert werden. Diese Stelle kann mit der erfolgreichen Reinigung des entsprechenden Substrats gleichgesetzt werden. Die zugehörige Zentrifugalbeschleunigung ist der Zielwert der vorliegenden Auswertung.

Um dieses Vorgehen zu formalisieren und zu festigen, bezieht es die Korrelationskoeffizienten der denkbaren Regressionskurven mit ein. Der Datenbereich, aus dem extrapoliert wird, wurde möglichst weit zugunsten eines hohen Korrelationskoeffizienten gewählt.

Dieses Vorgehen zur Auswertung eignet sich besonders, um die Reinigbarkeit bei unregelmäßig geformten Partikeln zu untersuchen. Aufgrund des charakteristischen Kurvenverlaufs kann der Reinigungspunkt sogar zu Zentrifugalbeschleunigungen extrapoliert werden, die mit einem gegebenen Zentrifugenaufbau nicht darstellbar sind.

### 3.6.2 Mustererkennung<sup>2</sup>

Das Einsparpotential in der automatisierten hygienischen Reinigung von Filtertüchern und das Verbesserungspotential im Gärtucheinsatz sollen nun mit einem neuen Konzept erschlossen werden: Der Verschmutzungsgrad des Tuchs wird er-

<sup>2</sup>Dieser Abschnitt basiert teilweise auf [75].

fasst, womit die Reinigung und ihre Intensität bedarfsorientiert geregelt werden können. Durch die automatische Kontrolle des Reinigungserfolges wird dieser Regelkreis geschlossen. In der Konsequenz kann die Reinheit nach jeder einzelnen Reinigung sichergestellt und dokumentiert werden, der Ressourcenverbrauch ist dabei minimiert, die Lebensdauer maximiert. Der hier vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der Eigenschaft gewebter Tücher, ein wiederkehrendes Muster aufzuweisen – den Rapport. Insbesondere partikuläre Verunreinigungen heben sich von diesem Webmuster ab. Damit liegt der erste Schritt unserer Bildauswertung in der automatischen Erkennung der Rapportgröße. Hierfür wurde das publizierte Verfahren der Vorwärtsdifferenzen nach Oh et al. [103] und Asha et al. [107] weiterentwickelt.

Die eigentliche Schmutzerkennung schließt sich im zweiten Schritt an. Sie greift auf die Vorwärtsdifferenzen zurück und setzt einen Haar-Filter ein, dessen Länge genau zwei Rapporte überspannt. Dadurch schlagen sich Verschmutzungen als Unregelmäßigkeiten vor dem vergleichsweise geordneten Hintergrund intensiv auf die Filterantwort durch. Diese ist durch einen einfachen Schwellwert auf Anwesenheit von Fremdkörpern hin auswertbar. Der Schwellenwert wird automatisch ermittelt und den Gegebenheiten, insbesondere dem beobachteten Tuch, angepasst.

Zwei weitere, alternative Methoden zur Weiterentwicklung und Verbesserung werden vorgestellt [74]: Dafür wird das Bild in Segmente aufgeteilt, die dem detektierten Rapport entsprechen. Diese einzelnen Bildausschnitte von wenigen Quadratmillimetern Objektgröße werden dann bezüglich ihrer Helligkeitshistogramme verglichen. Diese Methode ist sehr sensitiv bezüglich Verschmutzungen, aber auch hinsichtlich gleichmäßiger Ausleuchtung des Objekts. Abhilfe schaffen hier die als zweite Alternative vorgebrachten *Histogramme orientierter Gradienten* (HoG), die ungleiche Beleuchtung sehr viel besser tolerieren. HoG registrieren die Richtungen der Gradienten im betrachteten Bildausschnitt und geben dadurch Aufschluss über die Richtung der abgebildeten Kanten [123]. Liegt Schmutz im Bildbereich, so verändert er die Sichtbarkeit der Kanten (beziehungsweise Gradienten) und fügt eigene hinzu. Dies schlägt sich auf die Deskriptoren durch, sodass sich saubere und verschmutzte Bildbereiche unterscheiden lassen.

Bereits die Referenzimplementierung des vorgeschlagenen Algorithmus liefert insbesondere bei schlicht konstruierten Geweben mit übersichtlichen Rapporten zuverlässig Ergebnisse. Der schematische Aufbau des Algorithmus ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

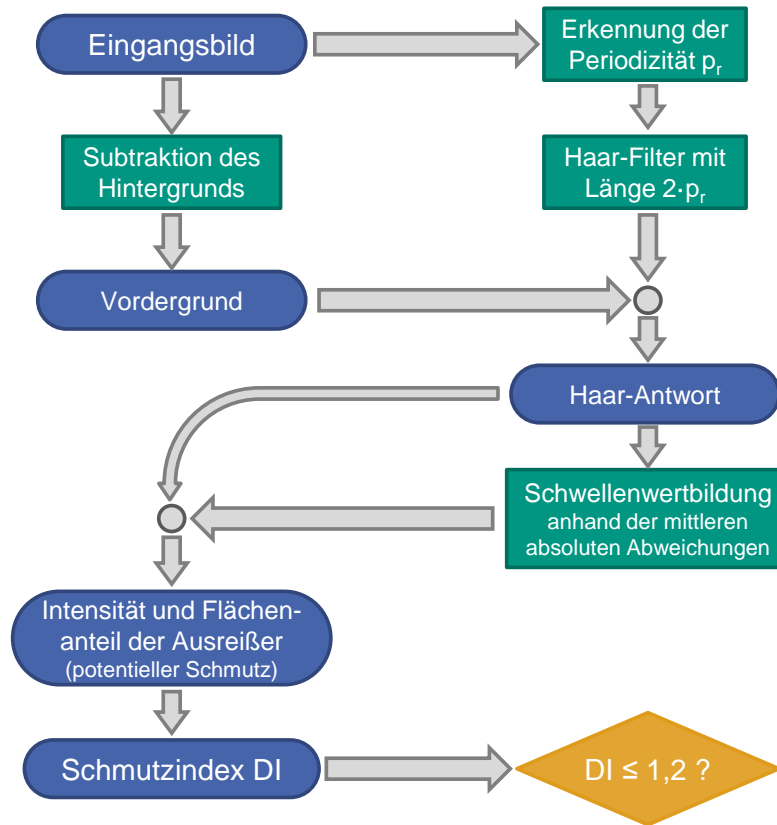


Abbildung 3.9: Der schematische Aufbau des Algorithmus zur Schmutzerkennung. Erklärungen in den Unterabschnitten zu Kapitel 3.6.2.

### *Bildauswertung*

Trotz aller Ähnlichkeiten mit anderen Anwendungsfällen unterscheiden sich die Anforderungen an die Bildauswertung bei der optischen Reinigungskontrolle. Im Vergleich zur Prozessüberwachung in der Weberei ist die Kategorisierung der Unregelmäßigkeiten von nachrangigem Interesse. Viel mehr ist daran gelegen, Strukturen kleiner als der Rapport oder sogar als der Garndurchmesser zu erkennen, was erst dann üblichen Schmutzpartikeln entspricht. Dafür sind sehr hoch auflösende Bilder erforderlich. In der synthetisierenden Computergrafik kann die Mustererkennung und -aufbereitung vorbereitet werden, sodass sie zur eigentlichen Laufzeit dann keinen zeitlichen Aufwand mehr verursacht. In der Reinigungsüberwachung ist die Ausführungs geschwindigkeit entscheidend, da Tücher in Quadratdezimeter- bis Quadratmetergröße pro Sekunde in Submillimetergenauigkeit überprüft werden sollen.

### *Periodizitätserkennung*

Da bei der Reinigungsanalyse das Tempo der Bildauswertung entscheidend ist und Bilder verarbeitet werden sollen, die wesentlich größer sind als die sonst üblicherweise maximal 256 mal 256 Pixel großen der Literatur [98], sollen hier nur fünf bis zehn zufällig ausgewählte Bildzeilen (oder -spalten, wenn nötig) nach der Methode von Asha et al. [107] untersucht werden. Die Vorwärtsdifferenzen werden im Rahmen dieser Arbeit anhand ihrer starken Linkskrümmung ausgewertet und identifiziert. Selbst auf stark verschmutzten Bildern erzielte der Algorithmus zuverlässige Ergebnisse bei nur einem Hundertstel an Zeitbedarf.

Bei der Anwendung in der Filtertuchüberwachung kann davon ausgegangen werden, dass der Bildausschnitt sehr leicht an der Richtung der Kett- und Schussfäden des Tuches auszurichten ist, ohne praktischen Einschränkungen zu unterliegen oder sonstige Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Vielmehr unterstützt dies die ideale Erkennung des rechteckigen Rappports und bringt die passgenau kleinsten Maße als Periodizität hervor, da die Kantenlänge des Rappports ermittelt wird und nicht seine zwangsläufig längere Diagonale. Dadurch bleibt auch die beste räumliche Auflösung für die anschließende Schmutzerkennung erhalten. Für die automatische Periodizitätserkennung ist ein Phasenversatz zum intuitiv erkennbaren Webmuster unerheblich, solange die Länge stimmt [124]. Dies trifft auch auf die eigentliche Webart zu, die unabhängig ermittelbar wäre [125]. Hilfreich könnte sie allerdings im Zusammenhang späterer Weiterentwicklungen hin zu feineren und sensitiveren Auswertelgorithmen werden.

### *Verstärkung des Vordergrunds*

Zur genaueren und empfindlicheren Rückstandserkennung von Partikeln ohne Farbkontrast kann eine Subtraktion des Hintergrunds als Zwischenschritt eingefügt werden. Dies erhöht den Kontrast zwischen Partikeln, die hochfrequentem Bildrauschen ähneln, und dem regelmäßigen, sauberen Garn. Da die Subtraktion weder eines einfachen noch eines gaußgewichteten gleitenden Durchschnitts überzeugen konnte, wird auch hier die Erosion am Graustufenbild mittels rollender Kugel eingesetzt. Diese ist von Sternberg inspiriert [92]: Ein Graustufenbild wird als Höhenkarte interpretiert. Über ihre Rückseite wird eine Kugel gerollt. Der höchste Punkt, den die Kugel an jeder Stelle erreicht, wird als Hintergrundwert aufgefasst; der Vordergrund ist die Differenz zwischen Original und Hintergrund.

Als Radius für die Kugel stellten sich hier 20 % der Periodenlänge als ideal heraus. Damit ist die Reproduzierbarkeit an den üblichen Tüchern am besten und die Kugel kann dem Garnverlauf gut folgen. Schmutzpartikel verursachen im Vordergrundbild eine rauere und ungleichmäßigere Helligkeitsverteilung. Die rollende Kugel kommt nicht in die feinen Helligkeitsspitzen der Partikel, wodurch sie vorrangig dem Vordergrund zugeschlagen werden. Leider ist der Rechenaufwand dieses Zwischenschritts auch unter Verwendung der kommerziellen Implementierung unter Matlab (Version 2017a) erheblich. Da er die Sensitivität gegenüber Einzelpartikeln jedoch wesentlich steigert, kann er sich sehr wohl bezahlt machen.

### *Erkennung von Unregelmäßigkeiten*

Hier soll das Bild mit einem Haar-Filter der doppelten Länge der zuvor erkannten Periodizität gefaltet werden. Da das Haar-Wavelet bildlich gesprochen die erste Hälfte mit der zweiten Hälfte seiner überstreichenden Länge vergleicht, entspricht unsere Filterantwort der Differenz zweier angrenzender Rapportbreiten plus dem eventuell vorhandenen Schmutz. Dadurch zeigt es vor allem den Übergang von sauberen zu unsauberen Bereichen und umgekehrt. Um möglichen Verzerrungen des Tuchs sowie Unzulänglichkeiten in der Bildaufnahme zu begegnen, können diese Haar-Faltungen nicht nur für einzelne Zeilen, sondern für eine beliebige Zahl aneinanderliegender Zeilen oder Spalten dank Integralbild ohne Mehraufwand durchgeführt werden [111, 126]. Weitere Vorzüge der Faltungsoperation ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber ungenauer Periodizitätserkennung, da sich der Fehler über die Bildbreite nicht akkumuliert, sowie die Toleranz gegenüber ungleichmäßiger Ausleuchtung des Objekts.

Es ist vorteilhaft, das zu untersuchende Bild nur in entweder horizontaler oder vertikaler Richtung zu prozessieren. Dadurch genügt die Ermittlung der Periodizität in nur dieser einen Richtung und der Rechenaufwand reduziert sich weiter. Da die meisten Rapporte eher quadratisch als übermäßig gestreckt sind, ist die Haar-Filterung entlang der längeren Seite des Bildes vorteilhaft, da hierbei ein größerflächiges Filtersignal erhalten bleibt. Dieses wird dann der Schwellenwertbildung und Rein-Unrein-Entscheidung übergeben.

### *Schmutzdetektion und Ausreißererkennung, Schwellenwertbildung*

Wenig Schmutz gleicher Farbe zu erkennen, stellt für etablierte Schwellenwertmethoden eine sehr große Herausforderung dar. Sie kommen in aller Regel mit unimo-



dalen Verteilungen nicht zurecht [94]. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit eine alternative Herangehensweise zur Ausreißerererkennung entwickelt. Die Haar-Operation sollte hinsichtlich ihrer Intensität eine normalverteilte Antwort liefern, wenn sie auf das Bild eines sauberen Tuchs angewendet wird. Jede zusätzliche Unregelmäßigkeit, und dabei vor allem Schmutz, verursacht eine deutlich größere Differenz zwischen zwei angrenzenden Rapporten und damit in der Haar-Antwort. Der hier vorgeschlagene Ansatz zielt darauf, zuerst die Haar-Antwort des sauberen Teils des Tuchs abzuschätzen und dann mit statistischen Methoden schmutzige Bereiche zu erkennen. Zunächst werden dafür Mittelwert und Standardabweichung  $\sigma$  der gesamten Filterantwort bestimmt. Dann werden alle Punkte, die weiter als  $1,645 \sigma$  vom Mittelwert abweichen, ausgeschlossen. Dies entspricht bei einer Normalverteilung den extremsten zehn Prozent. Von dieser Auswahl werden erneut Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Dieser neue Wert der Standardabweichung entspricht durch die ausgeschlossenen Extremwerte nur noch etwa 75,1 % der tatsächlichen Standardabweichung der ursprünglichen Normalverteilung. Dies berücksichtigend werden nun alle Punkte der ursprünglichen Filterantwort ausgewählt, die sich stärker als das 2,576-fache der korrigierten Standardabweichung vom Mittelwert unterscheiden. Diese Extremwerte sollten bei einer Normalverteilung ein Prozent der Fläche einnehmen und einen gewissen Beitrag zur *mittleren absoluten Abweichung vom Mittelwert* leisten (maA; konkret etwa 2,94 % zum Gesamtwert von  $0,8 \sigma$ , also 3,82 % des Anteils der weniger stark abweichenden Punkte). Wenn mehr als ein Prozent der Punkte als Ausreißer erkannt werden, oder ihre relative Abweichung stärker ausfällt, so ist von Verschmutzung auf dem Tuch auszugehen. Um diese Entscheidung zu formalisieren, wird der Schmutzindex  $DI$  eingeführt:

$$DI = A_{Extrema} \cdot \frac{maA_{Extrema}}{maA_{Zentrum}} \cdot \frac{100}{0,0382} \quad (3.2)$$

mit dem Flächenanteil  $A_{Extrema}$  der Extremwerte. Der Schmutzindex sollte sich bei einem idealen, reinen Tuch nicht von 1 unterscheiden; tut er es, ist Schmutz wahrscheinlich. Ngan et al. [127] tolerierten 0,2 % außergewöhnlicher Pixel, bevor sie ein Bild als schadhaft erachteten. Deshalb und um praktisch unausweichlichen Imperfektionen in Tuch und Bildaufnahme zu begegnen, betrachten wir ein Tuch erst dann als schmutzig, wenn sein Schmutzindex den Wert 1,2 übersteigt. In den durchgeführten Versuchen bestätigte sich dieser Betrag als sehr praktikabel.

### *Weitere Deskriptoren*

Wenn die einzelnen Rapporte des Filtertuchs erkannt und verfügbar sind, können sie auch wesentlich spezifischer analysiert werden. Die einfachste Möglichkeit wäre sicherlich, ihre durchschnittliche Helligkeit zu vergleichen; jedoch ist diese Methode auch vergleichsweise unempfindlich. Histogramme der Helligkeitsverteilung innerhalb eines Rapports sind in der Lage, deutlich schwächer ausgeprägte Abweichungen darzustellen. Aber auch sie sind empfindlich gegenüber ungleicher Ausleuchtung des Bildes. Dieses Problem wird von gradientenbasierten Methoden weitgehend gelöst. Hierzu zählen auch die Histogramme orientierter Gradienten (HoG) nach Dalal und Triggs [123]. In einer schlichten Implementierung können sie direkt auf ganze Rapportflächen angewendet werden. Ist jedoch das genaue Webmuster bekannt [125], können die Rapporte weiter in einzelne Domänen aufgeteilt werden. In Anlehnung an Weidemann et al. [81] bieten sich beispielsweise Bereiche von Kettfäden, Schussfäden, ihre Kanten, sowie die Zwickelbereiche dazwischen an, die dann mit spezifischen, lokaleren HoG-Deskriptoren ausgewertet werden. All dies fußt jedoch auf einer sehr genauen Erkennung der Periodizität, da sich ein Fehler hierbei über mehrere Rapporte anhäufen kann und dann die Zuordnung zu den eigentlichen Domänen behindert.

Deskriptoren, die auf Histogrammen orientierter Gradienten basieren, sollten ohne Normalisierung aufgebaut werden, um die Effekte schwacher, gleichmäßiger und verschwommener Verdeckungen und Überlagerungen zu erhalten. Damit sind HoG-basierte Bilddeskriptoren sehr vielversprechende Kandidaten, um auch sehr gleichmäßige Verschmutzung mit sehr kleinen Partikeln zu erkennen. Bisher behindert aber ihr Rechenaufwand noch ihren weiteren Einsatz.

## 4 Haftkräfte und Alterung<sup>1</sup>

### 4.1 Textur der Oberflächen

Um die Oberflächenparameter der ISO 25178-2 und die Rauheitswerte einzuordnen, betrachten wir zunächst geschmirgelte Oberflächen. Erwartungsgemäß weisen mit gröberer Körnung (Bezeichnung mit niedrigerem Wert der Maschenweite) geschmirgelte Bleche und PET-Flächen größere Rauheitswerte  $S_q$  auf. Der weichere Kunststoff ließ sich dabei leichter verformen und nahm bei gleicher Schleifmittelkörnung größere Rauheiten an.

Die um Ausreißer bereinigte Gesamtprofilhöhe, also die Summe der drei Profilhö-

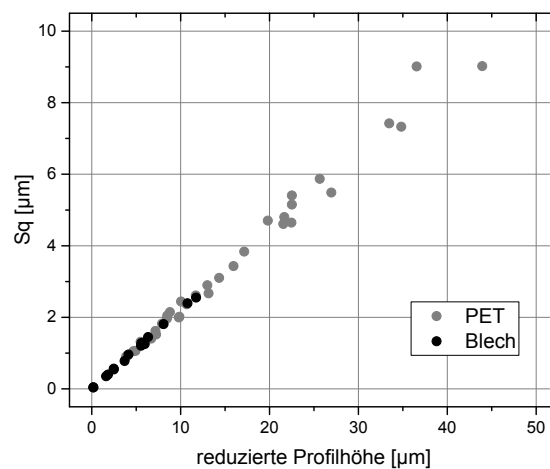


Abbildung 4.1: Geschmirgelte PET- und Edelstahloberflächen zeigen das selbe Verhältnis von Rauheit  $S_q$  zur Summe der reduzierten Profilhöhen  $S_{pk}$ ,  $S_k$  und  $S_{vk}$ . Dabei wird der Kunststoff rauer. Vergleiche allerdings Abbildung 4.2.

henparameter  $S_{pk}$ ,  $S_k$  und  $S_{vk}$ , steht bei beiden Oberflächenmaterialien bei nur sehr geringen Abweichungen im gleichen Verhältnis zueinander und beträgt das 4,5-fache des Rauheitswerts  $S_q$  (siehe Abbildung 4.1). Es unterscheidet sich jedoch die Zusammensetzung der Gesamtprofilhöhe durch ihre drei Komponenten: Beim Blech nimmt die Kernhöhe etwa 54 % der Gesamtprofilhöhe ein, beim PET sind es knapp 44 %. Der Rest verteilt sich auf Spitzen und Täler; beim PET überstreift die Spitzendomäne etwa 33 % des Gesamthöhenbereiches, die Täler entsprechend nur 23 %. Beim Edelstahlblech ist dieser Unterschied deutlich geringer mit 25 zu 21 % (siehe Abbildung 4.2).

<sup>1</sup>Dieses Kapitel basiert in Teilen auf den Veröffentlichungen [2, 3].

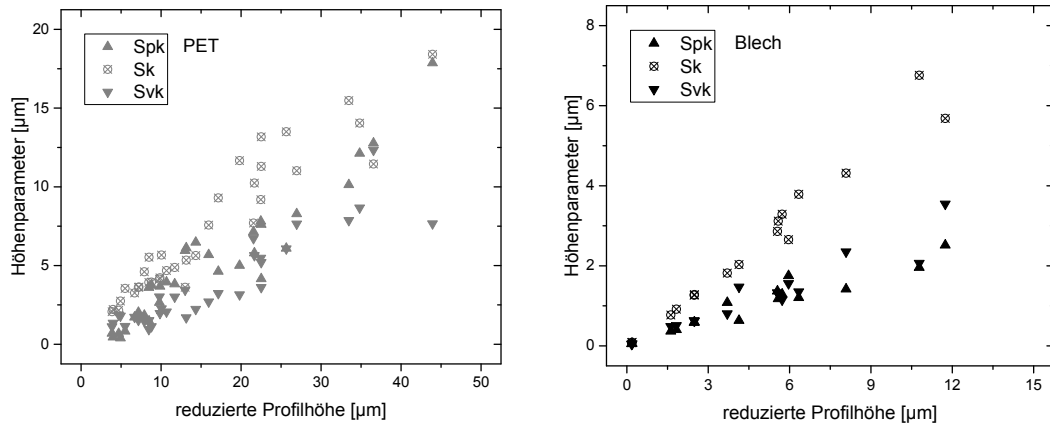


Abbildung 4.2: Die Zusammensetzung der Profilhöhe unterscheidet sich bei PET (links) und Edelstahlblech (rechts). Die Höhenparameter Spk, Sk und Svk stehen in unterschiedlichen Verhältnissen zueinander (unterschiedliche Skalierung).

Kunststoff fließt bei Deformation sehr viel leichter und erfährt deshalb einerseits die größere Rauheit bei gleichem Schmirgelkorn und bildet andererseits beim Schmirgeln lange Späne, die sich häufig nicht lösen, sondern als Grate an der Oberfläche hängen bleiben. Sie wurden hier für die weitere Charakterisierung und Verwendung der Substrate mit einer Rasierklinge abgezogen. Trotzdem bleibt die Tendenz des Kunststoffs zum Fließen in den hohen Graten deutlich ersichtlicher. Dazu gegensätzlich verhält sich das Blech: dort wird das Material offensichtlich aus der Oberfläche geschnitten und zerfällt zu kleinen abgelösten, pulverförmigen Spänen ohne große erhabene Gratabbildung.

Die beiden Materialien Edelstahlblech und PET verhielten sich beim Schmirgeln zwar ähnlich, was durch den Rauheitswert Sq sehr deutlich unterstrichen wird, die Oberflächenparameter der ISO 25178-2 (namentlich insbesondere Spk, Sk und Svk) zeigen hier jedoch erste Unterschiede, die auf das Werkstoffverhalten zurückzuführen sind. Seine Grenzen erreicht der Rauheitsparameter Sq allerdings schon, wenn das Bearbeitungsverfahren ein anderes ist.

Es wurden Edelstahlbleche unterschiedlich lange elektroliert und anschließend vermessen (siehe Abbildung 4.3). Diese Behandlung konnte durch die quadratische Mittenrauheit Sq nicht mehr nachgewiesen werden. Das heißt auch, dass sich der Rauheitswert von Blechen durch Elektropolitur nicht sinnvoll einstellen lässt. Mit der Behandlungsdauer konnte jedoch sehr gut Einfluss auf die Kerntiefe Sk des Oberflächenprofils genommen werden, die mit zunehmender Bearbeitungsdauer linear anstieg (Bestimmtheitsmaß 0,98 - 0,99) (siehe Abbildung 4.3). Dies unter-

streicht die Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit der Oberflächencharakterisierung nach den Parametern der ISO 25178-2.

Bei der Reproduzierbarkeit der Methode ist zwischen der mikroskopischen Bild-

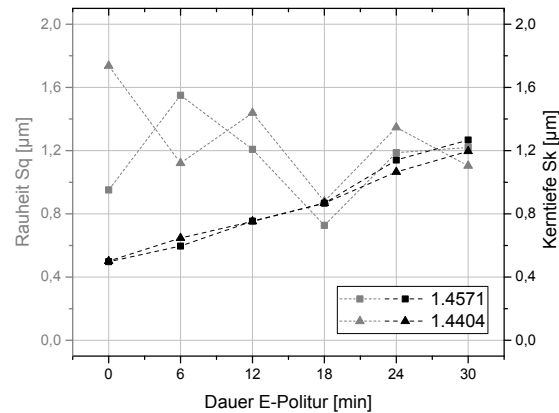


Abbildung 4.3: Rauheit und Kerntiefe nach verschieden langer Elektropolitur an Blechen zweier Edelstähle.

aufnahme und der anschließenden Auswertung des Oberflächenbildes zu unterscheiden. Zur Überprüfung wurde also ein Substrat mehrmals an verschiedenen Stellen gescannt und diese Aufnahmen jeweils einmal ausgewertet, sowie eine Aufnahme in verschiedenen Zuschnitten mehrmals ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 angegeben; die relative Standardabweichung beträgt in den meisten Fällen nur wenige Prozente.

Tabelle 4.1: Wiederholbarkeit der Oberflächenauswertung: relative Standardabweichung in Prozent der beiden Analyseschritte CLSM-Aufnahme und Auswertung nach ISO 25178-2.

Parameter	Wiederholung von	
	Scan [%]	Auswertung [%]
Sq	2,08	7,43
Sk	7,36	0,43
Spk	2,73	0,41
Svk	2,54	6,81
Smr1	7,31	0,40
Smr2	1,36	0,05
Sxp	6,91	0,31

## 4.2 Rückhalt von Mehl

### 4.2.1 An geschlossenen Oberflächen

Zunächst wurde eine Studie durchgeführt, bei der die einzelnen Mehlpartikelfraktionen vom **kaltgewalzten Blech** abgelöst wurden. Erwartungsgemäß ließen sich die größeren Partikel leichter entfernen (siehe Abbildung 4.4). Mit diesem größenabhängigen Ablöseverhalten wurde für die weitere Arbeit diejenige Mehlpartikelfraktion ausgewählt, deren Haftkraftverteilung am besten zum experimentell umsetzbaren Drehzahlbereich der genutzten Zentrifuge passte.

Auf dem kaltgewalzten, glatten Blech scheint die Hafttheorie nach Rumpf, be-

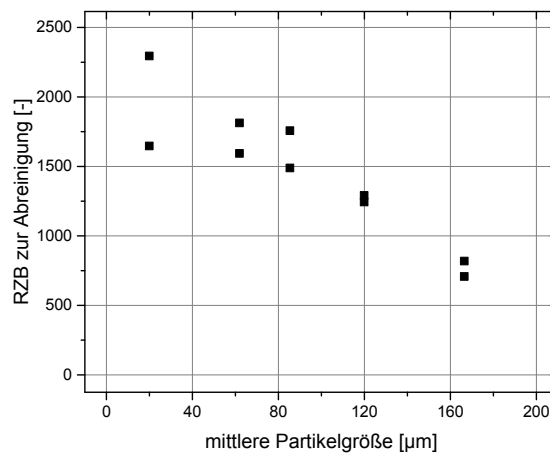


Abbildung 4.4: Die zur Abreinigung von Edelstahlblech nötige relative Zentrifugalbeschleunigung in Abhängigkeit von der mittleren volumengewichteten Partikelgröße. Fraktionen entsprechen denen in Abbildung 3.1

ziehungsweise der Dreipunkt-Kontakt nach Hartmüller et al. [27] gut anwendbar zu sein: Auf der ziemlich ebenen Oberfläche formen die (bei den Mehlfraktionen größer 35 µm) gleichartigen Stärkekörnchen sehr ähnliche Kontaktgeometrien; auf der Ebene setzen sich die Mehlpartikel mechanisch stabil auf mutmaßlich drei hervorstehenden Stärkekörnchen ab. Dadurch bilden sich betragsmäßig sehr ähnliche Haftkräfte aus; durch die unterschiedlich großen und damit auch unterschiedlich schweren Mehlpartikeln in den verschiedenen Fraktionen lassen sie sich aber bei verschiedenen Zentrifugalbeschleunigungen überwinden.

**Edelstahlbleche** mit unterschiedlicher Rauheit wurden mit Weizenmehlpartikeln bestäubt und die Haftkraft gemessen. Für jedes Blech ergab sich eine zur Abreinigung nötige Beschleunigung (siehe Abbildung 4.5). Jeder Datenpunkt steht für

Messungen mit durchschnittlich 1000 aufgefangenen Mehlpartikeln. Während sich die Umgebungsbedingungen zwischen 18 und 23°C mit  $50 \pm 5$  % relativer Luftfeuchte bewegten, konnte die Zentrifuge auf  $20 \pm 0,5$ °C geregelt werden.

Es ist aus Abbildung 4.5 ersichtlich, dass sich Bleche mit größerer Rauheit leichter von den Partikeln befreien lassen: Bei einer Rauheit  $S_q$  von 5  $\mu\text{m}$  beträgt die notwendige Beschleunigung nur noch 40 % des Wertes der glatten Bleche. Qualitativ entspricht dies den Ergebnissen von Fuller und Tabor [51], die abnehmende Haftkräfte von Kugeln zu Ebenen zunehmender Rauheit dokumentierten.

Durch die Ähnlichkeit der verschiedenen geschmirgelten Blechoberflächen unterein-

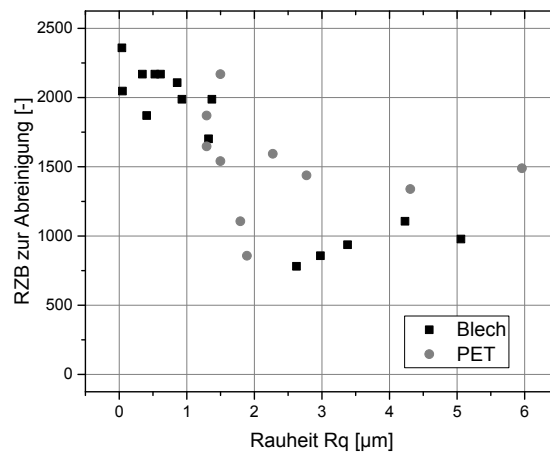


Abbildung 4.5: Die zur Abreinigung geschmirgelter Oberflächen nötige relative Zentrifugalbeschleunigung in Abhängigkeit von ihrer Rauheit. Mehlpartikelgröße nominell 60 bis 80  $\mu\text{m}$ .

ander ist davon auszugehen, dass auch die Profilspitzen gleich spitz sind und damit in der Kontaktzone zum Mehl sehr ähnliche Krümmungsradien besitzen. Die größeren Spitzen der gröberen Profile sorgen aber für eine weitere Separation zwischen Partikeln und restlicher Substratoberfläche und senken dadurch die Van-der-Waals-Kraft stärker als auf den feineren Blechen.

Die geschmirgelten **PET-Oberflächen** weisen einen ähnlichen Partikelrückhalt auf wie die Bleche. Inklusive der leicht andersartigen Oberflächentextur beim weichen Kunststoff ist somit kein Materialeinfluss zur Unterscheidung zum Edelstahlblech hinsichtlich der Größenordnung der Haftkraft zu erkennen. Einzig die Streuung der Messwerte ist tendenziell etwas größer. Außerdem senkt eine größere Rauheit den notwendigen Reinigungsaufwand weniger stark als beim Metall.

Vorversuche zeigten, dass die **relative Luftfeuchtigkeit** sich abhängig von der

Oberflächenrauheit erst ab Werten oberhalb 70 % auf die Partikelhaftkraft beim Mehl auswirkt. Dies entspricht auch den Aussagen von Turner und Balasubramanian [117]; deshalb spielten Kapillarkräfte im vorliegenden Aufbau keine Rolle.

Die hier relevanten Van-der-Waals-Haftkräfte hängen von der Oberfläche ab und skalieren damit anders als die volumenabhängigen Trägheitskräfte. Deshalb könnte in der Zentrifuge ein Klassiereffekt erwartet werden. Diese Vermutung gründet allerdings auf der Annahme, dass die Partikelform auch die Geometrie der Kontaktzone bestimmt. Dies ist jedoch nicht zutreffend bei Mehlpartikeln. Folglich ist es doch plausibel, dass hier auch kein wesentlicher Klassiereffekt beobachtet werden konnte. Vermutlich finden die Mehlteilchen beim Andrücken mechanisch günstige Positionen und größere Partikel können mehr Kontakte mit der furchigen und grätigen Oberfläche ausbilden, was Hartmüller et al. [27] Dreipunkt-Kontaktmodell in gewisser Weise relativiert. Dadurch würde die größere Partikelmasse zumindest teilweise kompensiert werden.

Größere Oberflächenrauheit wird in aller Regel mit einer schlechteren Reinigbarkeit assoziiert, vor allem in nassen Systemen [128]. Da dies den Beobachtungen in der hier vorgelegten Arbeit in gewisser Weise widerspricht, sollten Zielformulierungen über optimale Oberflächen wohl bedacht werden, bevor zu hohe oder zu niedrige Rauheiten angestrebt werden.

#### 4.2.2 An textilen Gärtüchern

Das Ablöseverhalten der Mehlpartikeln wurde an verschiedenen Gärtüchern aus Baumwolle und Polyester untersucht. Der auffälligste Unterschied zwischen den Tüchern dieser beiden Materialien ist das Erscheinungsbild der Fasern: Während die Baumwollfasern sehr kraus und unregelmäßig liegen und Baumwollgarn eher zerzaust und unförmig aussieht, schmiegen sich die glatten Polyesterfasern gleichmäßig aneinander. Allein daher ist eine unterschiedliche Reinigbarkeit zu vermuten (siehe Abbildung 2.2).

Eine weitere Annahme wäre, dass die Mehlpartikel mit den exponierteren Strukturen der Tücher interagieren. Dies spiegelte sich dann in einem Zusammenhang mit den Spitzenhöhen oder dem Spitzenanteil wieder. Tatsächlich findet sich jedoch noch nicht einmal ein Zusammenhang mit Kernparametern; diese oberen beiden Regionen der Tücher bestimmen nicht den Partikelrückhalt

Vielmehr steht dieser Rückhalt im Zusammenhang mit den Profiltälern, insbesondere bei den PET-Tüchern. Je weniger Flächenanteil die Täler einnehmen und je



weniger tief sie sind, desto leichter ist das ganze Tuch zu reinigen (siehe Abbildung 4.6). Dies deutet auf eine deutliche Korrelation zu den mesoskopischen Zwickeln und Vertiefungen in der Oberfläche der Tücher hin. Vom Garn hängt dieser Effekt nicht ab, da dasselbe Garn in jedem Tuch gleichzeitig auch die Oberfläche der Kern- und Spitzenregion bildet und dort das Mehl nicht so stark zurückhält. Darüber hinaus weisen die Profiltäler sehr ähnliche Abmessungen wie die Mehlpartikel auf, was Voraussetzung zum Einlagern, Festklemmen und Verkeilen ist und damit diesen Haftmechanismus hier sehr nahe legt.

Baumwolltücher lassen sich offensichtlich leichter vom Mehl befreien als Polyester-

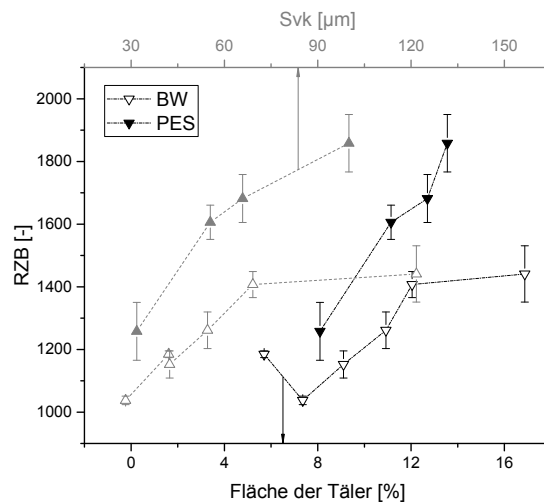


Abbildung 4.6: Die zur Abreinigung nötige Beschleunigung in Abhängigkeit von Tuchmaterial, reduzierter Taltiefe  $S_{vk}$  (Symbolspitze oben) und Flächenanteil der Täler (Symbolspitze unten). Mehlpartikelgröße nominell 60 bis 80  $\mu\text{m}$ .

tücher, sie erfordern eine relative Zentrifugalbeschleunigung von nur  $1250 \pm 200$  verglichen mit  $1600 \pm 200$  beim Polyester (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung). Dies ist ein Materialeffekt, da das Phänomen unabhängig von den größeren geometrischen Oberflächeneigenschaften ist.

Vermutlich lässt sich das verschiedene Abreinigungsverhalten auf die unterschiedlichen Primärfasergeometrien zurückführen. Die Schlaufen, Vorsprünge und Kanten der Baumwolle besitzen zusätzliche Unebenheiten auf einer Größenskala unterhalb des Faserdurchmessers, die von den Parametern der ISO 25178-2 kaum erfasst werden. Einerseits halten diese Unebenheiten Partikel auf Abstand zu den Fasern, was die Haftkraft schwächt [20]. Andererseits verursachen sie auch das voluminösere, unförmigere Erscheinungsbild des Baumwollgarns, halten dort auch die Einzel-

fasern untereinander auf Abstand und reduzieren so die Anzahl an möglichen Kontaktpunkten für die Mehlpartikel im Vergleich zum deutlich gleichmäßigeren Polyestergerüst. Somit relativiert sich auch auf den Tüchern als Substrat Hartmüller et al. [27] Dreipunkt-Hafttheorie.

Die neu vorgeschlagene Methode zur Haftkraftauswertung bewährt sich auch im sehr schwierigen Umfeld der einerseits ansonsten sehr weit streuenden Partikelhaftkräfte [56, 113] und der andererseits zusätzlich multiskalig texturierten Oberflächen gewebter Tücher. Da sowohl Partikeleigenschaften als auch Geometrie der Kontaktzone starken statistischen Einflüssen unterliegen, basiert jede theoretische Haftkraftberechnung auf zahlreichen Annahmen. Damit ließen sich innerhalb offensichtlich üblicher und plausibler Schätzwertbereiche annähernd beliebige Beiträge als Haftkraft herleiten.

Ein guter Hinweis darauf, dass die Geometrie der Kontaktzone nicht mit der Mehlpartikelgröße oder -form korreliert, ist, dass auch hier kein klarer Hinweis auf einen Klassiereffekt beobachtet werden konnte. Das Bestauben mit Einzelpartikeln, wie es Podczeck berichtet [57], entspricht nicht der Realität in der Bäckerei. Daher schien es angemessen, sich nicht auf eine bessere Dispergierung des Mehls zu konzentrieren, zumal die neuartige Dateninterpretation ohnehin vollkommen unbeeinflusst von zusammengelagerten selbsthaftenden Partikeln bleibt.

## 4.3 Haftspannung von Teig

### 4.3.1 An geschlossenen Oberflächen

#### *Blech*

Verschiedene Edelstahloberflächen wurden hinsichtlich ihrer Teighaftung untersucht: kaltgewalztes, sowie unterschiedlich grob geschmirgelte Bleche mit Rauheiten  $S_q$  von 0,2 bis 2,3  $\mu\text{m}$ . Es wurden jeweils zwei gleiche Oberflächenproben in Sechsfachbestimmung pro Kontaktdauer eingesetzt. Die Teigproben wurden entweder 1 oder 10 Minuten bei 400 Umdrehungen pro Minute in der Zentrifuge angepresst. Dies entsprach einer relativen Zentrifugalbeschleunigung von 20, womit an der Kontaktfläche ein deutlich höheres, brötchengroßes Teigstück simuliert wird.

Weder die Oberflächenbehandlung noch die Kontaktdauer zeigten einen signifikanten Einfluss auf die Haftspannung des Teigs. Im Mittel haftete der Weizenteig mit einer Kontaktfestigkeit von 7,0 kPa auf den Edelstahlblechen.

Ein Einfluss jedoch wurde deutlich: das Alter des Teiges. Bei der längeren Kontaktzeit schwächte sich die Kontaktfestigkeit und schmälerte sich ihre relative Streubreite mit zunehmendem Teigalter (siehe Abbildung 4.7). Dabei waren Oberflächenqualität und Teigalter unkorreliert.

Das altersabhängige Verhalten ist den biochemischen Prozessen im Teig geschul-

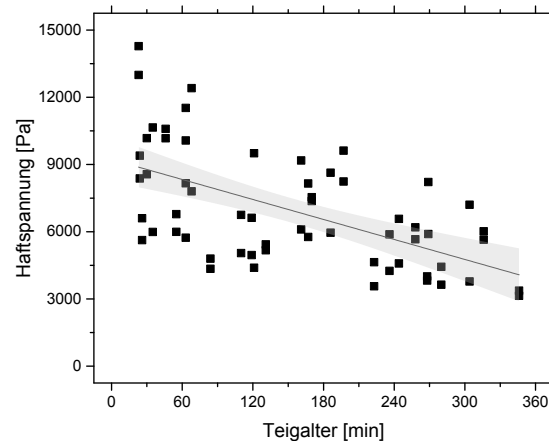


Abbildung 4.7: Haftspannung von Teig auf Edelstahlblech in Abhängigkeit des Teigalters nach 10 Minuten Kontaktdauer. Haftspannung und Rauheit waren unkorreliert.

det, also Abbaureaktionen, die auch von getreideeigenen Enzymen katalysiert werden können. Diese spiegeln sich in den rheologischen Eigenschaften des Teiges wider [129]. Dass sich der ältere Teig nach unterschiedlichen Kontaktzeiten unterschiedlich verhält ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der Weizenteig verhältnismäßig langsam kriecht [7]. Die geringere Kontaktdauer von einer Minute wäre also unter Umständen zu kurz für den Teig, um an der Kontaktfläche vollständig zu relaxieren.

Letang et al. [129] berichteten über alternden Teig, dass sowohl sein viskoses Speichermodul als auch der Betrag seiner komplexen Viskosität abnimmt und damit seine Elastizität. Sie führen dies auf den Abbau des Glutennetzwerks zurück. Die Zunahme an kleineren Molekülen führt zu einem Anwachsen der mobilen Phase im Teig, was die Ausbildung eines Flüssigkeitsfilms an der Kontaktfläche erleichtert. Dieser könnte die Abnahme der Haftspannung mit zunehmendem Alter erklären. Da auch die mobilen Glutenbruchstücke noch immer deutlich größer als Wassermoleküle sind, nimmt ihre Diffusion einige Zeit in Anspruch. Wenn die Filmbildung an der Kontaktfläche nun länger als eine Minute bräuchte, wäre dies eine weite-

re Erklärung, weshalb sich das Teigalter erst nach längerer Kontaktdauer auswirkt.

### *Transportbänder verschiedenen Materials und unterschiedlicher Oberflächenstruktur*

Neun verschiedene kommerzielle Förderbänder aus dem Lebensmittelbereich wurden untersucht. Die Förderbänder lassen sich nach der Erscheinung ihrer Oberflächen drei Gruppen zuordnen: eben und matt, eben und glänzend, sowie texturiert mit Rippen- oder Waffelstruktur. Die Oberflächen bestanden nach Herstellerangaben aus thermoplastischem Olefin (TPO), Polyvinylchlorid (PVC) oder thermoplastischem Polyurethan (TPU) (siehe Tabelle 3.1). Der Modellteig wurde 1 Minute in der Zentrifuge auf die Förderbandssubstrate angepresst. Durch diese kurze Kontaktzeit konnte ein möglicher Einfluss des Teigalters ausgeschlossen werden, außerdem bestand kein Zusammenhang zwischen Teigalter und Substrat beziehungsweise korrelierten Haftspannung und Teigalter nicht (das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,11).

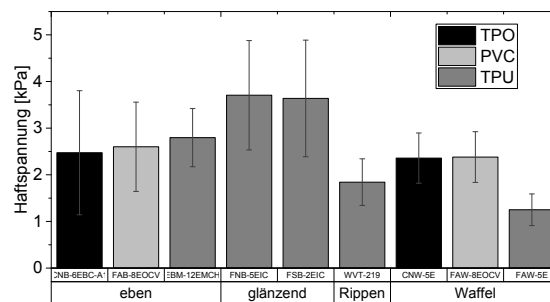


Abbildung 4.8: Haftspannung von Teig auf Förderbändern: Texturierung (siehe auch Abbildung 4.9) senkt die Haftung und verringert die Streuung der Messwerte (Konfidenzintervalle).

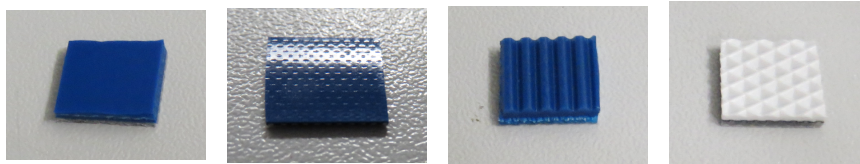


Abbildung 4.9: Beispiele für die Texturierung der Förderbänder: matt, glänzend, Rippen, Waben. Probengröße jeweils 1 cm<sup>2</sup>.

Im Vergleich zu den Edelstahlblechen reduziert sich die Teighaftung um mindestens die Hälfte, ein Einfluss innerhalb der verschiedenen Polymeren als Kontaktpartner war jedoch nicht zu erkennen (siehe Abbildung 4.8). Sehr deutlich ist der Zusammenhang des Haftverhaltens zu der offensichtlichsten Oberflächeneigenschaft, ihrer Erscheinung: glänzende Oberflächen haften am stärksten, die texturierten am wenigsten. Letztere streuen in ihren Haftwerten außerdem am geringsten (siehe auch Abbildung 4.9).

Üblicherweise versagt eine Haftverbindung nicht an der gesamten Kontaktfläche gleichzeitig, sondern die Bruchkante breitet sich von einer Fehl- oder Schwachstelle ausgehend über die Verbindung aus [31]. Statistisch verteilte Unebenheiten bedingen statistisch verteilte Schwachstellen und bewirken so die stochastische Verteilung des Haftversagens an den ebenen Kontakten. Matte Oberflächen definieren sich über ihre hohe Dichte an Unebenheiten, die dann die Haftverbindung schwächen. Glänzende Oberflächen besitzen weitaus weniger Unebenheiten, was das Versagensverhalten sehr viel anfälliger für situative Einflüsse macht. Die texturierten Bänder bewahren makroskopische Lufttaschen in ihrer Oberflächenstruktur und halten dadurch unter dem aufliegenden Teig regelmäßig verteilte Dreiphasengrenzen vor. Von diesen aus kann sich der Teig sehr zuverlässig ablösen, weshalb sich die Streubreite der Haftmessungen an diesen Oberflächen stark reduziert.

Ghorbel und Launay [65] führten Haftkraftversuche mit Teig an verschiedenen festen Untergründen durch. Ihre Ergebnisse unterlagen sehr starken Einflüssen des Wassergehalts im Teig und nur geringeren durch die Oberflächenmaterialien. Davon abgesehen presste Ghorbel den Teig etwa zehnmal so stark, dafür nur wenige Sekunden, an und löste die Haftverbindung mit einer definierten Geschwindigkeit. Damit unterscheidet sich Ghorbels Vorgehen deutlich vom hier vorgestellten auch in rheologischer Hinsicht: Unsere beschleunigungs- und damit kraftbestimmte Methode zwingt dem Teig weder Deformation noch Ablösung auf, solange er der aufgebrachten Kraft widerstehen kann. Auch gestattet es unsere Methode dem Teig, sich langsam und in seinem der Kraft entsprechenden Tempo zu deformieren und zu lösen, da sie ihm die nötige Zeit dazu gewährt. Dies entspricht auch der technologischen Anwendung, wenn dort der Teigling unter der vorgegebenen Erdbeschleunigung abgeworfen werden soll, dem aber nicht zwangsläufig folgt.

### 4.3.2 An textilen Gärtüchern

Drei Baumwoll-, ein Mischgewebe- und vier Polyestertücher wurden hinsichtlich ihrer Teighaftung untersucht. Die Vorgehensweise entsprach der bei den Edelstahlblechen, einschließlich der kurzen und der langen Kontaktdauer von 1 beziehungsweise 10 Minuten. Die Haftspannung des Teiges lag zwischen 2 und 4 kPa. Ein bemerkenswerter Unterschied zwischen den verschiedenen Gärtuchmaterialien zeigte sich beim Vergleich der Kontaktdauern: Von Baumwolltüchern löste sich der Teig nach längerem Kontakt leichter als nach nur kurzem Kontakt, beim Polyester war dieser Trend andersherum ausgeprägt: Hier haftete der Teig nach längerer Kontaktzeit besser. Das Mischgewebe folgte in seinem Verhalten der Baumwolle (siehe Abbildung 4.10).

Vermutlich kriecht der Teig an den unterschiedlichen Tüchern gleichermaßen in

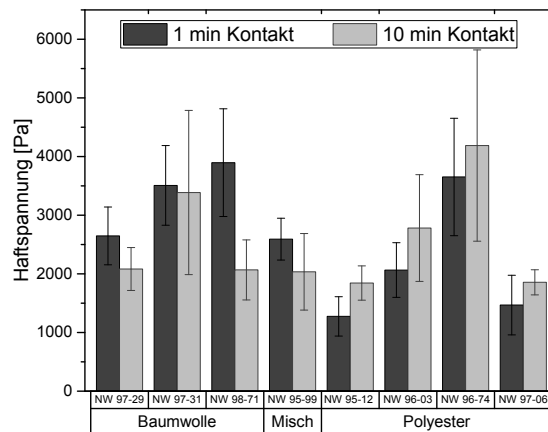


Abbildung 4.10: Teighaftung an verschiedenen Gärtüchern nach kurzem und längerem Kontakt (Konfidenzintervalle).

das Oberflächenprofil während er sie benetzt [33] und seine inneren Spannungen relaxiert [7]. Eine hydrophilere Oberfläche würde stärker mit einem Flüssigkeitsfilm der mobilen wässrigen Phase des Teigs interagieren und dabei das Glutennetzwerk von der direkten Garnoberfläche verdrängen. Somit könnte der Teig beim Kontakt mit den Baumwollfasern langsam einen Flüssigkeitsfilm ausbilden, der den theoretischen Zugewinn an Haftung durch die weitere Benetzung überkompensiert. Wenn das hydrophobere Polyestertuch keinen solchen Film hervorruft, steigt hier die Haftung merklich an.

Neben dem Materialeinfluss gibt es allerdings auch einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Haftspannung und den mechanischen Oberflächeneigenschaften,

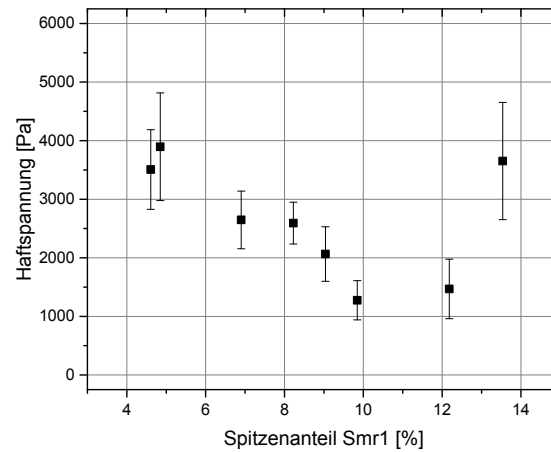


Abbildung 4.11: Teighaftung an Gärtüchern in Abhängigkeit des Spitzenanteils Smr1 (Konfidenzintervalle).

insbesondere den Profilspitzen und hier beispielsweise dem Parameter Smr1 (siehe Abbildung 4.11). Dieser bezeichnet ihren Flächenanteil. Je größer er ist, desto leichter löst sich der Teig. Dies entspricht auch der Beobachtung von Derler et al. [130], die die Interaktion von menschlicher Haut mit Bettlaken untersuchten. Sie beschreiben, dass Tücher mit größerem Spitzenanteil, aber auch mit größerer maximaler Spitzenhöhe  $S_{xp}$  geringere Reibung übertrugen, geringere Kontaktflächen ausbildeten und besser belüfteten. All diese Faktoren beeinflussen auch die Teighaftung positiv und reduzieren sie.

Heddleson et al. schlugen bereits vor [61], gewisse Parameter anzupassen, um die Teighaftung zu minimieren; wie sie auf Wassergehalt, Temperatur oder Ablösegeschwindigkeit zu zielen, hatte in der vorliegenden Arbeit jedoch keinen praktischen Nutzen, da es entweder das Produkt verändert (über den Wassergehalt), die Prozessführung (über die Temperatur), oder sogar die ganze Produktionslinie (um in einer alternativen Teighandhabung andere Ablösegeschwindigkeiten umzusetzen). Diese Arbeit zeigt auf, dass das Haftverhalten von Teig auch über die andere Seite, über die Oberflächenstruktur der Kontaktpartner sinnvoll steuerbar ist.

#### 4.4 Alterungsverhalten textiler Gärtücher

In diesem Abschnitt soll zunächst diskutiert werden, welchen Veränderungen Gärtücher während der Alterung unterworfen sind (Mikroskopbilder in Abbildung 4.12). Außerdem werden die Auswirkungen der Veränderungen auf ihre techno-

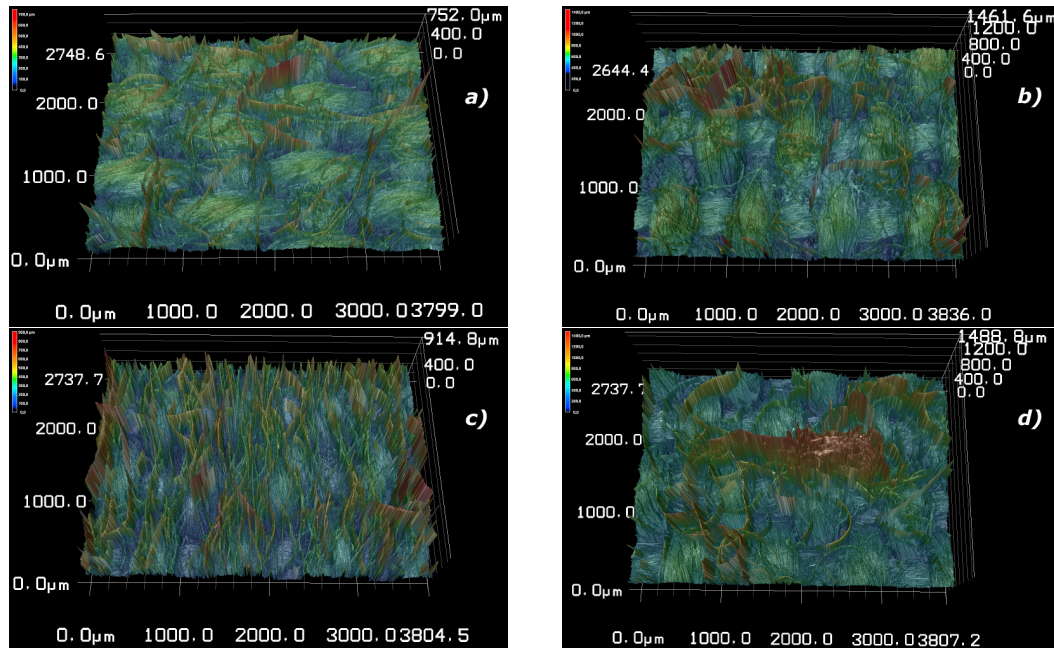


Abbildung 4.12: CLSM-Aufnahmen des unterschiedlich gealterte Gärtuchs aus Polyester: a) neu; b) nach 12 Wochen praktischem Gebrauch; c) nach 186 Bürstgängen; d) nach 10 Waschgängen (unterschiedliche Skalierungen).

logischen Eigenschaften und den praktischen Gebrauchswert ermittelt. Einerseits wurde die Alterung der Tücher durch den üblichen, praktischen Gebrauch erreicht, andererseits wurden einzelne Aspekte im Labor unter genauer Kontrolle nachgestellt. Dieser Vorgang wird weiter unten genauer beschrieben. Der Fokus bei der Oberflächenbeschreibung liegt auf der extremen Spitzenhöhe  $S_{xp}$ , da bereits Derler et al. die Bedeutung der Höhenverteilung des Oberflächenprofils herausstellten [130].

#### 4.4.1 Auswirkungen auf die Oberflächeneigenschaften

##### *Durch praktischen Gebrauch*

Die in der Bäckerei gealterten Tücher zeigten materialabhängig ein sehr charakteristisches Verhalten (siehe Abbildung 4.13). Das Polyestertuch wurde zunehmend aufgeraut, wobei die extreme Spitzenhöhe  $S_{xp}$  zunahm. Das Baumwolltuch verhielt sich umgekehrt, hier nahm die Spitzenhöhe tendenziell ab. Das Mischtextil blieb mit seiner extremen Spitzenhöhe innerhalb eines schmalen Wertebereichs



und zeigte dabei keine Tendenz in der Richtung. Verglichen mit den anderen beiden vorgestellten Alterungsmethoden verursachte der praktische Gebrauch die geringste Änderung an der extremen Spitzenhöhe der Gärtücher.

Vermutlich werden alle Tücher im Gebrauch aufgeraut, wenn Einzelfasern beschä-

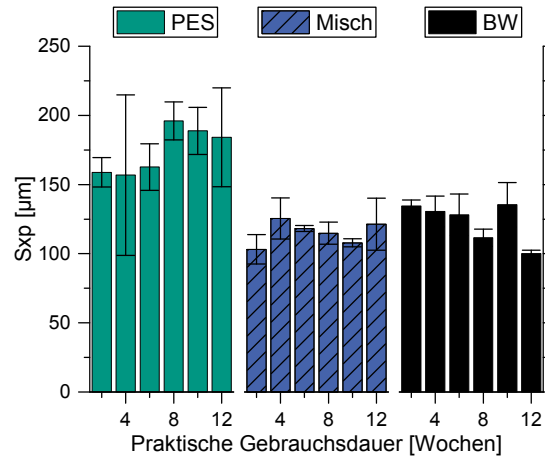


Abbildung 4.13: Die maximale Spitzenhöhe unter praktischem Gebrauch in der Bäckerei.

digt werden und mit ihren offenen Enden als Haare auf der Oberfläche sitzen. Herausgelöste, vereinzelte und hervorstehende Baumwollfasern lösen sich jedoch vermutlich aufgrund ihrer geringeren Länge aus dem Garn, gehen verloren und mindern dabei die Profilspitzen. Oder sie brechen gleichzeitig wieder ab, da ihr Material chemisch angegriffen wird und weniger widerstandsfähig ist. Dies entspricht den Berichten Bajpays et al., die beobachteten, dass Mikroorganismen sich eher auf Baumwolle denn auf Polyester niederließen [131], den Hinweisen Bobeths und Szostak-Kotowas, Polyester sei sehr viel resistenter gegenüber mikrobiellem Abbau als Baumwolle ([132], erwähnt von: [133] und [134]) und Laukemper, die auf unseren Textilproben tatsächlich Cellulose abbauende Schimmelpilze nachwies [12, 13]. Damit ist sicherlich davon auszugehen, dass die Baumwolltücher im praktischen Einsatz tatsächlich biologisch angegriffen und geschädigt wurden.

#### *Durch Bürsten*

Bürsten zieht lose Fasern aus dem Garn und streckt und richtet sie an der Oberfläche, ohne das Material chemisch zu verändern. Dabei steigt die Haarigkeit und die extreme Spitzenhöhe nimmt zu (siehe Abbildung 4.14). Nach einer gewissen Phase

der Zunahme der Spitzen wird ein Plateau erreicht. Diese Einlaufphase vollzieht sich beim Mischgewebe am schnellsten, ist jedoch von der geringsten Auswirkung gemessen an der Änderung in Sxp. Das Baumwolltuch besaß die längste Einlaufphase und das Polyestertuch veränderte sich am stärksten. Dies kann mit der Geometrie der Primärfasern begründet werden: Die erschmolzenen Polyesterfasern besitzen eine sehr glatte Oberfläche, mit der die Fasern leicht aneinander abgleiten und sich wenig gegenseitigen Halt geben. Die krausen Baumwollfasern bleiben viel eher aneinander hängen, verhaken und bremsen sich und verzögern somit das Erreichen der Endkonfiguration.

Bürsten stellt eine alternative Möglichkeit dar, die Haarigkeit zu erhöhen. Sie

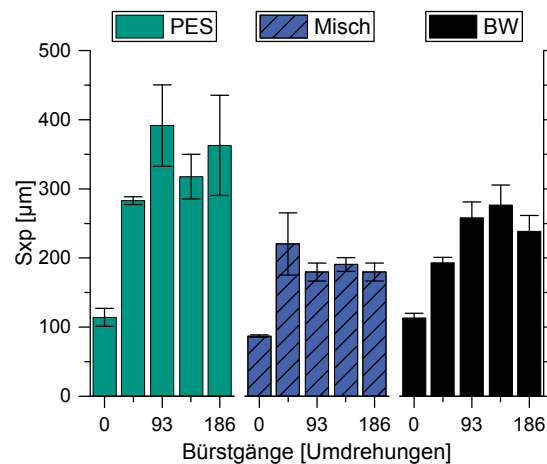


Abbildung 4.14: Zunahme der maximalen Spitzenhöhe durch Bürsten.

hebt sich von anderen beschriebenen, verschleißenden Methoden ab, da sie nicht die Höhe der Textilien mindert [135, 136]. Außerdem wird das Tuch beim Bürsten nicht exzessiv geschädigt, anders als beim Schmirgeln [137], wo das Garn bewusst abrasiv geschwächt wird.

#### *Durch Waschen*

Die Vollwäsche steigerte die extreme Spitzenhöhe am Polyestertuch sehr stark, wobei der erste Waschgang den größten Effekt erzielte (siehe Abbildung 4.15, links). Die Veränderung an der Oberfläche unterschied sich allerdings von der durch Bürsten: Waschen steigerte nicht die Haarigkeit, sondern rief Fussel- und Knötchenbildung hervor (*Pilling*, vergleiche auch Abbildung 4.12). Diese entstehen, wenn sich lose Fasern verhaken und unter Reiben und Walken kugelig an

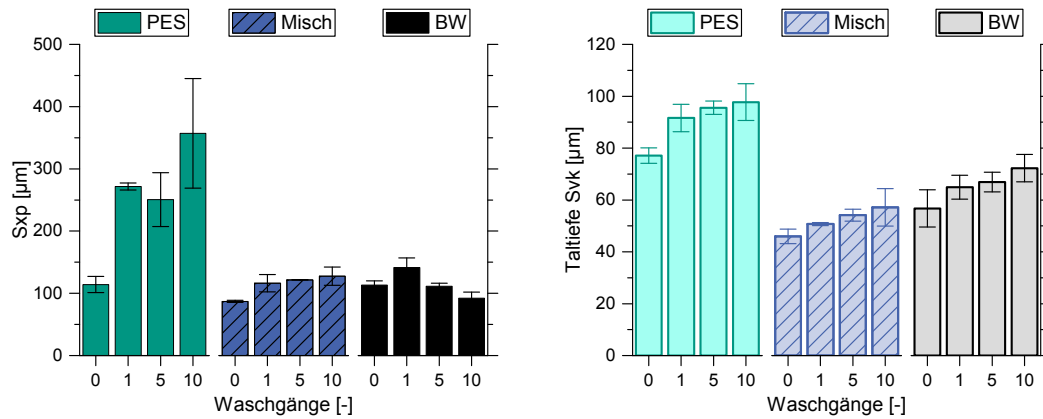


Abbildung 4.15: Extreme Spitzenhöhe (links) und Taltiefe (rechts) bei gewaschenen Gärtüchern.

einzelnen, in der Oberfläche verankerten Fasern zusammenballen. Da die extreme Spitzenhöhe am Polyestertuch zunimmt, scheinen die Fasern dort fest und stabil genug, um die Knötchen zu halten. Die Baumwollfasern scheinen deutlich schwächer zu sein, zumal sich die Haarigkeit hier reduzierte. Eine weitere Erklärung liegt unter Umständen auch in der Methode der Trocknung. Wenn sich die Kapillaren der Zwickelflüssigkeit zusammenziehen, ziehen sie beim Trocknen an den losen Fasern und ebenen so das Profil des Tuches ein.

Waschen veränderte die extreme Spitzenhöhe am Baumwolltuch in keine eindeutige Richtung, eventuell tendiert sie nach einer initialen leichten Zunahme mit steigender Zahl an Waschgängen zur moderaten Abnahme. Beim Mischgewebetuch ist nach einem eventuellen, dem Baumwolltuch ähnlichen, leichten Anfangsverhalten keine weitere Veränderung zu beobachten.

Hinzu kam allerdings bei allen drei Tüchern eine Vertiefung der Profiltäler, also zu einer Zunahme der reduzierten Taltiefe Svk (siehe Abbildung 4.15, rechts). Dies ist äußerst nachteilig hinsichtlich des Rückhaltevermögens von Mehlpartikeln, da das Mehl aus den Tälern schwerer zu entfernen ist (siehe Abbildung 4.6).

#### 4.4.2 Auswirkungen auf die Haftphänomene

Die Haftkraftversuche für diesen Teil der Arbeit wurden wie an den neuen Tüchern durchgeführt, allerdings wurde die Kontaktzeit auf eine Minute reduziert.

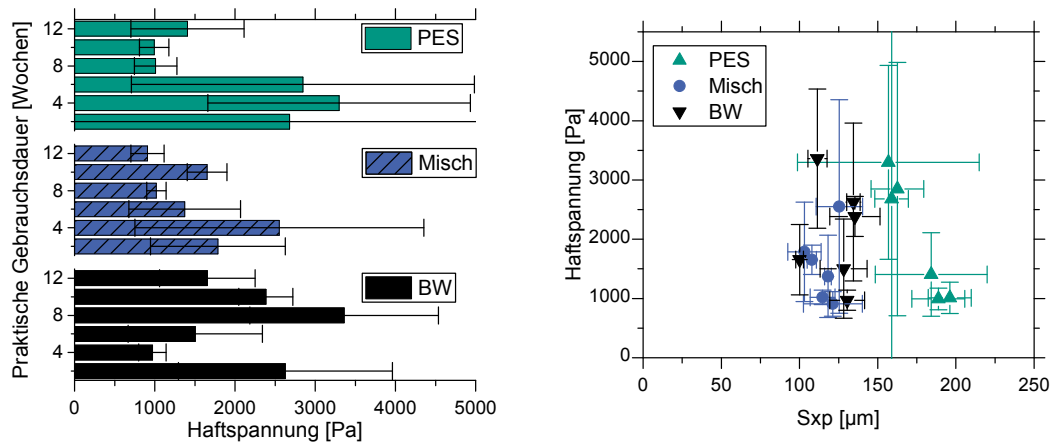


Abbildung 4.16: Teighaftung auf gebrauchten Tüchern in Abhängigkeit von der Einsatzdauer (links) und der veränderten Oberfläche (rechts).

### *Durch praktischen Gebrauch*

Trägt man die Teighaftung nach der Dauer des praktischen Einsatzes der Tücher auf, so ergibt sich kein klares Bild (siehe Abbildung 4.16 links). Beim Polyester-tuch zeigten sich zwei unterschiedliche Niveaus der Haftspannung: ein hohes von etwa 3 kPa innerhalb der ersten 6 Wochen und ein niedriges von etwa 1 kPa ab 8 Wochen des Gebrauchs. Diese zwei Gruppen erschienen bei Betrachtung der extremen Spitzenhöhe wieder (siehe Abbildung 4.16). Dabei unterstreicht der Vergleich von Haftkraft und Spitzenhöhe  $S_{xp}$  ihren entgegengesetzten Zusammenhang sehr deutlich. Beim Baumwoll- und beim Mischgewebetuch zeigte sich kein Zusammenhang der Haftspannung weder zur Gebrauchsdauer noch zur extremen Spitzenhöhe. Das scheint ein starkes Indiz dafür zu sein, dass zwei unterschiedliche Alterungsmechanismen wirken. Zwar werden alle Tücher mechanisch verändert, aber nur der Baumwollanteil unterliegt einer zusätzlichen biochemischen Schädigung, die weiter reichende Veränderungen hervorruft.

### *Durch Bürsten*

Das Bürsten verminderte die Teiganhaftung so dramatisch, dass zur ordentlichen Versuchsdurchführung eigens auf den weicheren, klebrigeren Teig mit Teigausbeute 170 umgestiegen werden musste. An allen drei Tüchern nahm die Haftspannung des Teiges mit steigender Spitzenhöhe  $S_{xp}$  annähernd linear ab (siehe Abbildung 4.17, rechts). Mit der extremen Spitzenhöhe nimmt auch die Haarigkeit der Tü-

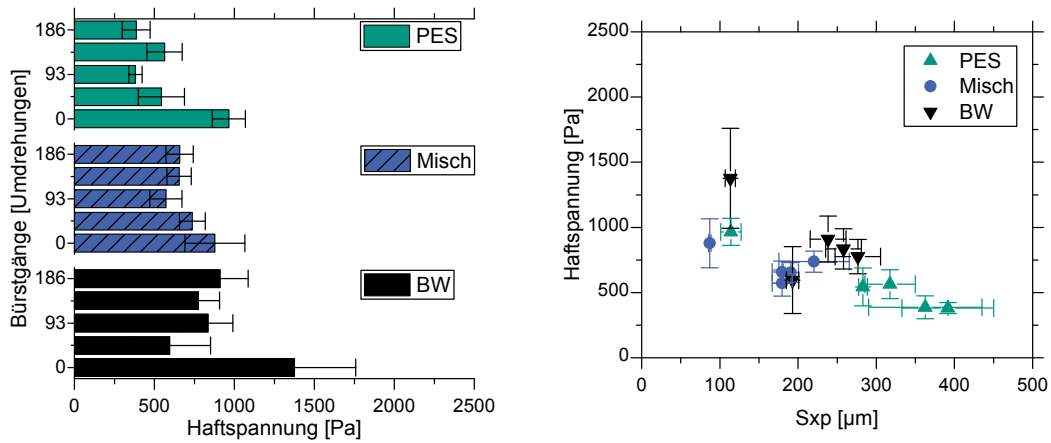


Abbildung 4.17: Teighaftung auf gebürsteten Tüchern in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer (links) und der veränderten Oberfläche (rechts).

cher zu (vergleiche auch Abbildung 4.12).

Die aufgerichteten Fasern halten den aufliegenden Teig von der restlichen Oberfläche des Gärtuchs fern und wirken offensichtlich wie ein tucheigenes Trennmittel. Dabei ist zwischen vielen kurzen oder wenigen langen Fasern als Auflagefläche für den Teig zu unterscheiden. Beim Abziehen des Teigs hält dieser sich nur an den hervorstehenden Fasern, die wiederum nur an einem Punkt, ihrer Basis, am Tuch befestigt sind. Während der Teig eine gewisse Strecke vom Tuch weg gezogen wird, richten sich die Fasern auf, sodass sie sich auch nur um genau diese Strecke vom Teig lösen. Über die Dicke der Einzelfaser kann zusammen mit der Ablösestrecke die neu geschaffene, befreite Fläche abgeschätzt werden. Bei vielen kurzen Haaren auf der Oberfläche hängen viele Kontaktpunkte gleichzeitig am Teig; bei wenigen langen Haaren widersetzen sich entsprechend weniger Ablösestellen gleichzeitig dem Abziehen, was die Abziehkraft und damit die scheinbare Haftspannung reduziert. Die Ablösearbeit ist dabei dieselbe, sie verteilt sich allerdings auf die größere Länge der gestreckten Fasern, womit auch das Integral aus Kraft und Weg erhalten bleibt, eine physikalisch notwendige Randbedingung (siehe Abbildung 4.18).

### *Durch Waschen*

Gewaschene Polyestertücher folgen dem oben genannten Zusammenhang zwischen Spitzenhöhe und Haftspannung. Bei Baumwoll- und Mischgewebetuch gab es kaum Änderung in der Spitzenhöhe und keinen Zusammenhang mit der Haftspannung.

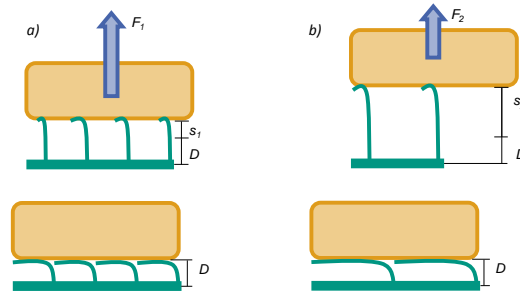


Abbildung 4.18: Wirkung der Haarigkeit auf die scheinbare Haftspannung: Von kurzen Haaren muss die Ablösearbeit auf der Strecke  $s_1$  geleistet werden, es stellt sich die Haftkraft  $F_1$  ein (links). Von längeren Haaren verteilt sich eine gleichgroße Ablösearbeit auf die wesentlich längere Strecke  $s_2$ . Es stellt sich in der Folge eine geringere scheinbare Haftkraft  $F_2$  ein.

Die Teighaftung nahm auf dem Baumwolltuch allerdings mit der Zahl an Waschgängen zu (siehe Abbildung 4.19). Dies ist besonders deshalb besorgniserregend, da insbesondere die Baumwolle allein wegen des Materialerhalts von schädigenden Mikroorganismen dringend frei gehalten werden sollte.

Die Abnahme der Haftspannung am Polyestertuch durch Waschen fiel deutlich schwächer aus als nach dem Bürsten. Die Fusseln und Knötchen stützen den Teig weniger gut als die feiner verteilten Haare. Sie sind zwar größer und wahrscheinlich auch druckfester, treten aber seltener und in größeren Abständen verteilt auf der Oberfläche auf und lassen sich weniger gleichmäßig vom Teig abziehen als die Einzelfasern. Dadurch kann einerseits der Teig zwischen den Knötchen tiefer in das

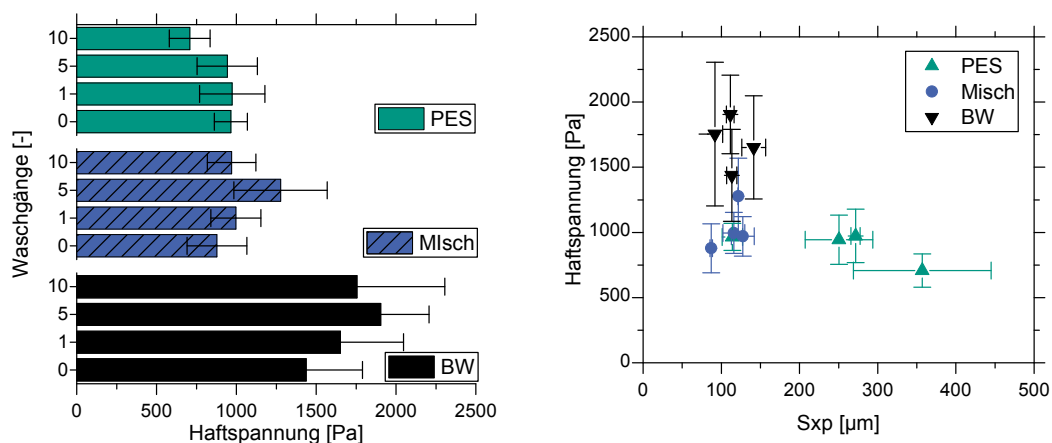


Abbildung 4.19: Teighaftung auf gewaschenen Tüchern in Abhängigkeit von der Zahl der Waschgänge (links) und der veränderten Oberfläche (rechts).

Oberflächenprofil einsacken und andererseits verteilt sich die Haftarbeit beim Lösen auf eine deutlich kürzere Strecke. Damit steigt die Haftspannung absolut durch die größere Kontaktfläche und wird durch die konzentriertere Ablösung weniger geschwächt. Knötchenbildung auf den Gärtüchern verbessert ihre Oberflächeneigenschaften vom technologischen Standpunkt her also in keiner relevanten Weise. Die die Haarigkeit hervorrufenden Fasern wurden wahrscheinlich entfernt, entweder durch Abbrechen oder durch Einarbeiten in die Knötchen, was die Oberflächen an ihnen verarmen ließ. Um den für die Oberflächen negativen Auswirkungen des hygienisch notwendigen Waschens entgegenzuwirken, sollten verschiedene Kombinationen von Trocknen und Nachbehandlung angewendet werden: Trocknen im Wäschetrockner bewirkt bekanntermaßen einen weicheren Griff am Stoff. Dieser könnte mit einer verlängerten Ablösestrecke und damit der scheinbar verringerten Haftspannung einhergehen. Leichtes Walken könnte beim Trocknen Kapillarbrücken aufbrechen und dadurch Einzelfasern wieder befreien und aufrichten. Stärkere mechanische Arbeit könnte neue, zusätzliche Einzelfasern aus dem Garn lösen oder sogar Fasern brechen, um zusätzliche Enden und damit Haarigkeit zu schaffen; die drastischste Form wäre das Schmirgeln [137]. Dies schädigt allerdings das Tuch und senkt damit seine Lebensdauer. Eine leichte Dampfbehandlung könnte eine Alternative sein.





## 5 Bildanalytische Überwachung<sup>1</sup>

Dieses Kapitel widmet sich der innovativen Tuchüberwachung, mit deren Hilfe auch der Zustand der Gärtücher in Echtzeit erfasst werden kann. Der Algorithmus ist vielseitig an gewebten Tüchern einsetzbar und generiert Wissen über ihren Verschmutzungszustand. Damit lassen sie sich bedarfsgerecht reinigen. Die ursprüngliche Konzeptionierung zielte auf die Reinigung von Filtertüchern aus Filterpressen und Bandfiltern, deren Intensität geregelt werden sollte.

Es ist davon auszugehen, dass auch das Bürsten die Gärtücher verschleißt. Ihre Einzelfasern werden wahrscheinlich unter den technologischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen keine Dauerbiegefestigkeit erreichen. Daher ist auch das Bürsten nur dosiert einzusetzen. Das Optimum zwischen intensiverem Bürsten, um die Wäsche hinauszuzögern, und häufigerer Wäsche, um vorzeitiger Abnutzung durch das Bürsten zuvorzukommen, könnte in späteren Arbeiten mit einer ebensolchen verbesserten Einsatzführung und den optimierten Gärtüchern untersucht werden. Dabei wäre die im Folgenden beschriebene Bildanalytik geeignet, als Messwerkzeug und Regelinstrument zu dienen. Ausgehend von dem ursprünglichen Entwicklungsziel, den Zustand von Filtertüchern zu überwachen, orientiert sich die folgende Ausarbeitung auch an dieser Aufgabenstellung.

### 5.1 Versuchsaufbau

Um die neuentwickelte Bildauswertung zu validieren, wurden Bilder sauberer, schmutziger und zunehmend gründlicher gereinigter Tücher benötigt. Um auch das große Potential des Algorithmus aufzuzeigen, Partikel ohne Farb- und Helligkeitsunterschied zu erkennen, wurden ein weißes Filtertuch und rote Glaspartikel gewählt. Das Digitalfoto in RGB kann dann zum Vergleich in den kontrastarmen Rot- und den kontrastreichen Grünkanal aufgeteilt werden.

Ein 0,1 m mal 0,2 m großes Stück Filtertuch weißer Farbe in Leinwandbindung (Tetex Multi 07-15-380 W, Sefar AG, Heiden) wurde auf einen Rahmen gezogen und in einer einfachen Strahlreinigungsapparatur installiert. Das Tuch wird hier an zwei Flachstrahldüsen vorbeigeführt. Die Modellkontamination bestand aus etwa zwanzig Volumenprozent kugeligen roten Glaspartikeln von 70 bis 110 µm (SiLibeads S, Sigmund Lindner GmbH, Warmensteinach) in einer farblosen Ver-

---

<sup>1</sup>Dieses Kapitel basiert auf den Veröffentlichungen [74, 75].

dickerlösung von 1 % [m/m] Hydroxyethylcellulose (Tylose 100000 YP2, SE Tylose GmbH & Co. KG, Wiesbaden) in deionisiertem Wasser, in Anlehnung an den VDMA-Reinigungstest [86]. Diese Dispersion wurde auf den Tüchern verteilt und über Nacht trocknen gelassen, um den Partikelrückhalt zu verbessern, die Reinigung zu verlangsamen und damit mehr Bilder aus dem fortschreitenden Reinigungsprozess gewinnen zu können. Gereinigt wurde mit deionisiertem Wasser, das aus einem Vorlagebehälter mittels Druckluftpolster gefördert wurde. Der Fortschritt der sanften Reinigung wurde fotografisch (Canon EOS 7D mit 5184 mal 3456 Pixel CMOS-Sensor; Objektiv: Tamron AF 18-250 mm F/3,5-6,3 Di II LD Aspherical (IF) Macro) aus etwa 0,5 m Entfernung dokumentiert. Beleuchtet wurde mit zwei Halogenstrahlern (kaiser studiolight 1010, Kaiser Fototechnik GmbH & Co. KG, Buchen; je 1000 W).

Weiterverwendet wurden die Rohbilder (RAW-Dateien), indem sie in ImageJ aufeinander ausgerichtet und auf das gemeinsame Maß von 3200 mal 3000 Pixel (Breite mal Höhe, entsprechend 66,3 mal 62,2 mm auf dem Tuch) beschnitten und in den Rot- und Grünkanal herausgelöst wurden. Dieser verhältnismäßig große Bildausschnitt besitzt den Vorteil der feinen Auflösung von etwa 48 Pixeln pro Millimeter Tuch in dieser Konfiguration (entsprechend 20,7  $\mu\text{m}$  pro Pixel). Im Rotkanal sind die roten Partikel vor dem weißen Hintergrund kaum zu erkennen, damit sind diese Aufnahmen ideal, um die Fähigkeiten der neuen Schmutzerkennungsmethode zu demonstrieren. Der maximierte Kontrast im komplementären Grünkanal dient der direkten Kontrolle der Ergebnisse (siehe Abbildungen 5.1 und 5.2).

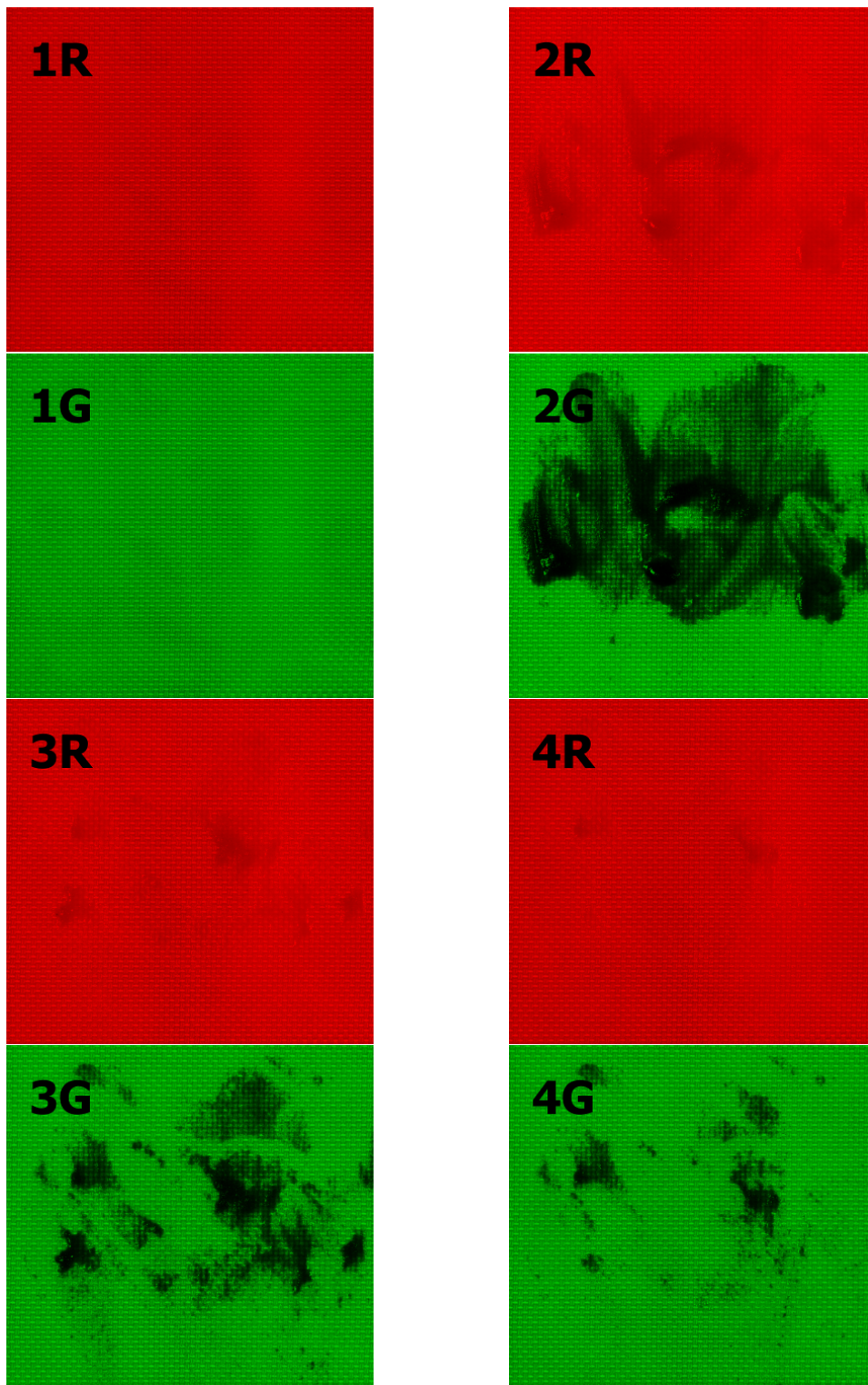


Abbildung 5.1: Beispielbilder zur Schmutzauswertung, Rotkanal (R) und Grünkanal (G): 1) sauberes Tuch; 2) verschmutzt; 3) und 4) fortschreitende Reinigung. Bildbreite je 62,2 mm. Fortsetzung.

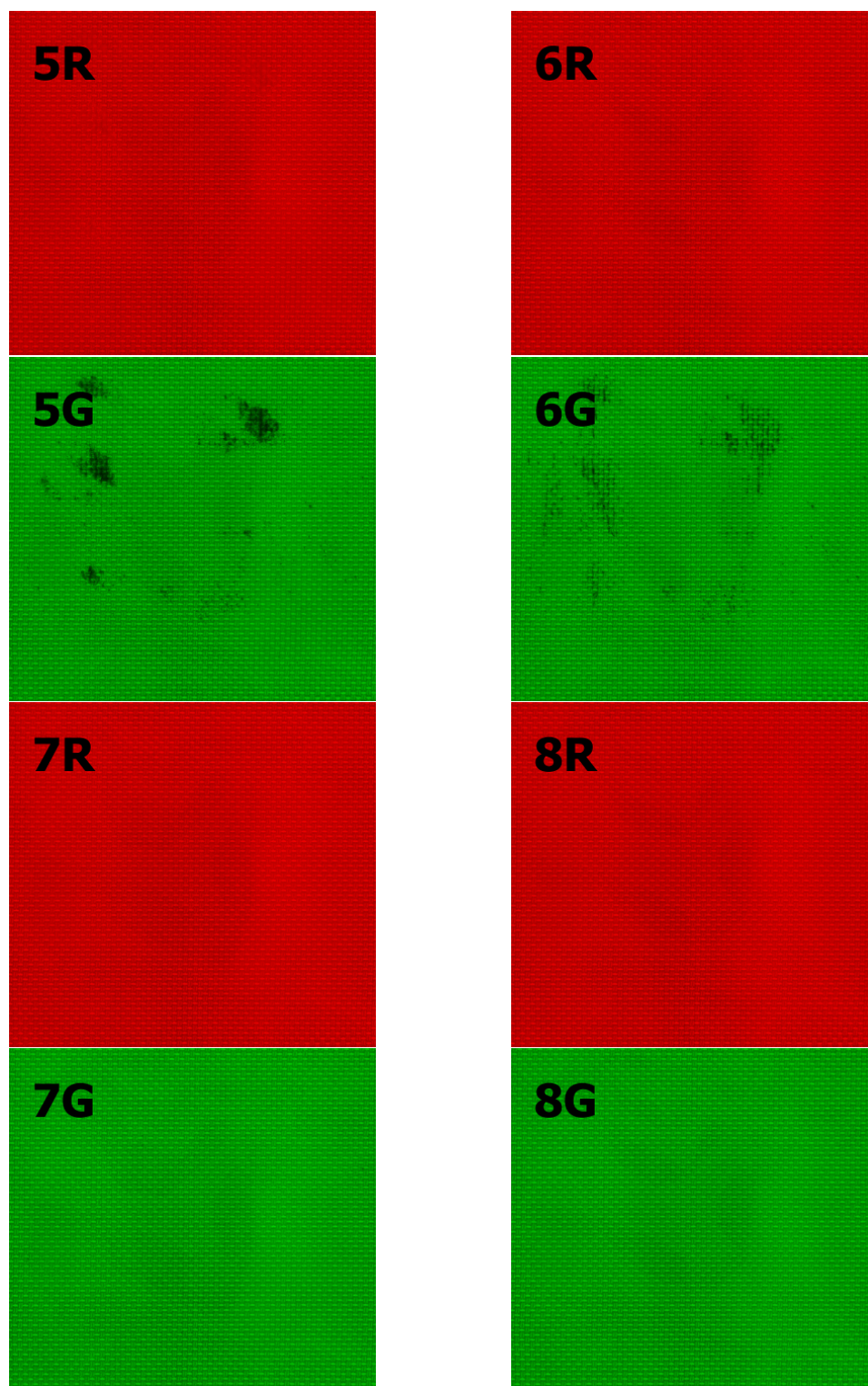


Abbildung 5.2: Fortsetzung: Beispielbilder zur Schmutzauswertung, Rotkanal (R) und Grünkanal (G): 5) - 7) fortschreitende Reinigung, bis zum vollständig gereinigten Tuch (8). Bildbreite je 62,2 mm.

## 5.2 Periodenerkennung

In diesem Abschnitt soll die Periodizitätserkennung betrachtet und ihre Anwendung auf sauberem und stark verschmutztem Hintergrund verglichen werden. Als Beispiel dienen Abbildungen 5.1 und 5.2. Die vektorielle Vorwärtsdifferenz  $\Lambda_r$  des ganzen Bildes weist eine starke Periodizität auf (siehe Abbildung 5.3), allerdings können hier lokale Minima innerhalb des sich wiederholenden Musters noch stärker ausgeprägt sein als die zur Periodizität gehörigen Minima. Da mit zunehmender Vorwärtsverschiebung die sich überlagernde Fläche abnimmt, reduzieren sich Amplitude und Betrag der Funktion bis auf null bei Erreichen der Bildbreite. Die zweite Vorwärtsdifferenz  $\Delta\Lambda_r$  überwindet diese Schwäche, da ihre ausgeprägteren lokalen Minima der Periodizität entsprechen und auch gleichzeitig die Stellen mit der stärksten Linkskrümmung sind. Dadurch sind sie leicht automatisch zu identifizieren (siehe Abbildung 5.3). Starke Verschmutzung mindert die Deutlichkeit der Minima in der zweiten Vorwärtsdifferenz  $\Delta\Lambda_r$ , zwar, diese bleiben dennoch klar und eindeutig zu erkennen (siehe Abbildung 5.4).

In Abbildung 5.5 überlagert die erkannte Periodizität von 90 Pixeln (entsprechend

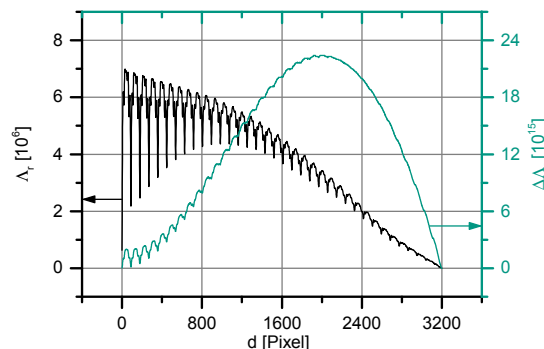


Abbildung 5.3: Vorwärtsdifferenz und zweite Vorwärtsdifferenz des sauberen Tuchs (Abbildung 5.1-1R).

1,865 mm) das Originalbild. Die ganzzahlige Periodizitätserkennung verursacht einen kleinen Rundungsfehler  $\epsilon$ , der sich dann über die Bildbreite aufsummiert. Dies verdeutlicht der Phasenversatz, in Abbildung 5.5 unten als  $k \cdot \epsilon$  bezeichnet. Für die Verwendung eines weiterentwickelten Deskriptors entsprechend Abschnitt 3.6.2 stellt dies ein Problem dar, für den gleitenden Haar-Filter ist es jedoch unerheblich.

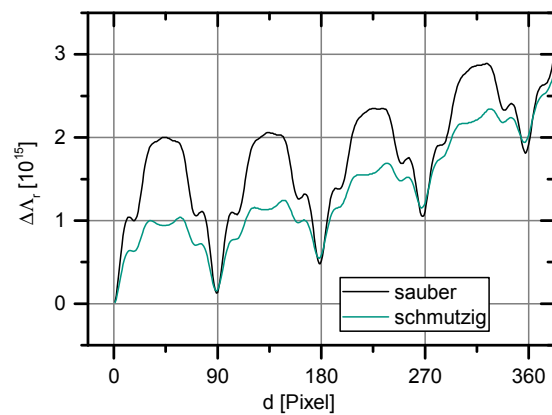


Abbildung 5.4: Zweite Vorwärtsdifferenz von sauberem und stark verschmutztem Bild (Abbildung 5.1-1R und -2R).

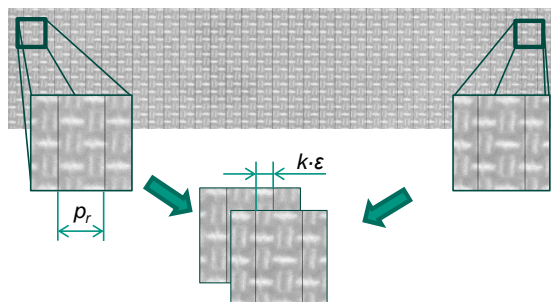


Abbildung 5.5: Aufsummierter Phasenversatz  $k\epsilon$  in der Periodizitätserkennung durch Rundungsfehler in der Periodizität  $p_r$ .

### 5.3 Schmutzdetektion

Vom Eingangsbild wird der Hintergrund abgezogen (siehe Abbildung 5.6). Dadurch treten kleine Unterschiede und besonders unruhige Bildbereiche, wie beispielsweise kleine Partikel, deutlicher hervor. In der Folge können auch Verschmutzungen erkannt werden, die sich ohne Farbkontrast auch nicht in ihrer mittleren Helligkeit vom dahinterliegenden Tuch unterscheiden (siehe Abbildung 5.7). Sollte doch ein Helligkeitsunterschied vorliegen, wie hier etwa im Grünkanal, so können Einzelpartikel zuverlässig identifiziert werden (siehe Abbildung 5.8). Der nächste Schritt der Auswertung, die Haar-Transformation in der doppelten Länge der Periodizität, kann als zeilenweiser, gleitender Vergleich zweier nebeneinanderliegender Rapporte verstanden werden (siehe Abbildung 5.9). Wo sich die Bildzeile innerhalb einer Rapportbreite von der nachfolgenden Rapportbreite unterscheidet, weil sie unterschiedlich sauber ist, steigt der Betrag der Filterantwort. Die eigentliche Schmutzerkennung erfolgt anhand der Filterantwort und dem Schmutzindex. Der Verlauf des Schmutzindex der Bilderserie in Abbildung 5.1 und 5.2 ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Trotz der zum Teil sehr starken Anschmutzung übersteigt der Schmutzindex den Wert von 1,7 nicht. Tatsächlich erreicht er seinen höchsten Wert im kontrastreichen Grünkanal erst mit der fortgeschrittenen Reinigung, nach dem dritten Durchgang, wo der meiste Schmutz bereits entfernt ist und nur noch kleine Felder vorliegen. Dies liegt an der Konzeption der Schmutzerkennung, die von der Theorie her nur auf ein Prozent an verschmutzter Oberfläche

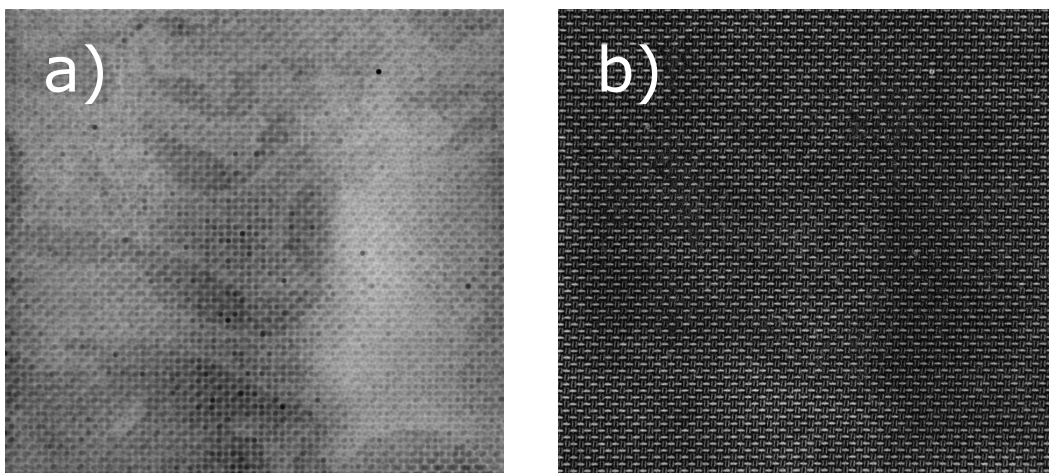


Abbildung 5.6: Zu Abbildung 5.2-6R: a) der Hintergrund nach der Methode des rollenden Balles, b) die Differenz zum Eingangsbild.

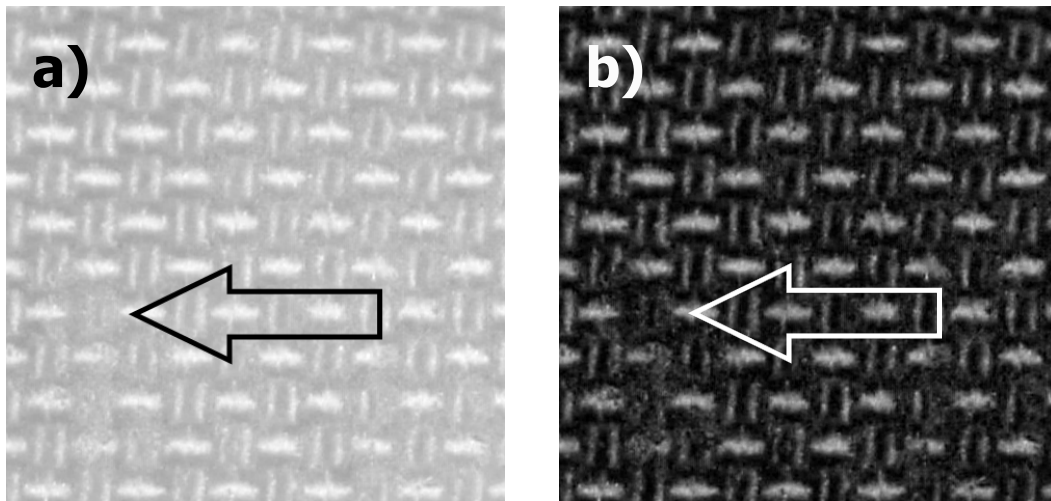


Abbildung 5.7: Detail eines kontrastarmen Verschmutzungsdepots (Pfeil) aus Abbildung 5.2-6R: a) Eingangsbild, b) nach der Hintergrundsubtraktion.

im ganzen Bild abzielt. Dabei vergleicht der Algorithmus nur dieses extremste eine Prozent mit der restlichen Filterantwort. Ist dieser Rest auch nennenswert verschmutzt, so sticht das extremste eine Prozent viel weniger hervor. Vor diesem Hintergrund erscheint der Algorithmus sehr viel potenter: Ausgelegt für feinste Kontaminationen kommt er auch mit groben Verschmutzungen zurecht. Sollte ein quantitatives Maß für den Verschmutzungsgrad gewünscht sein, so sind auch die

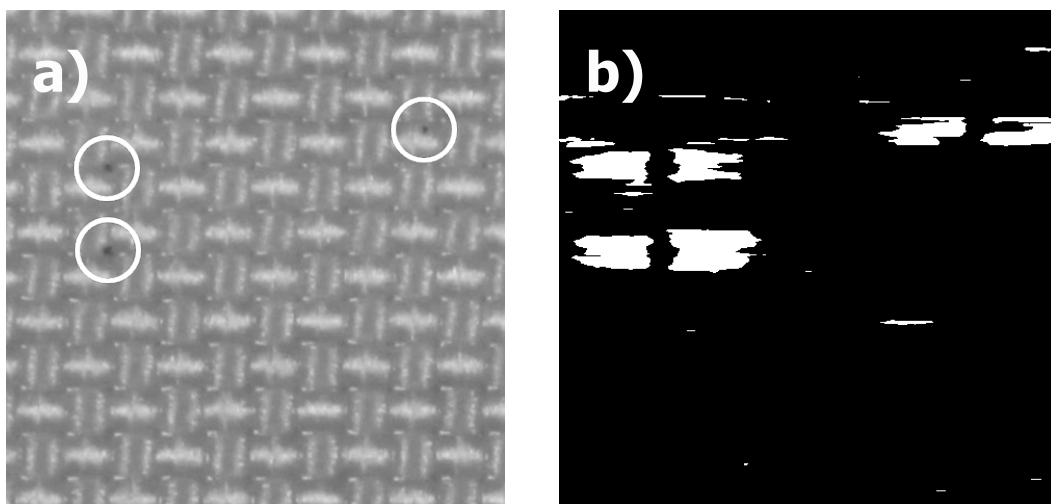


Abbildung 5.8: Detail kontrastreicher Schmutzpartikel (eingekreist, etwa 150-250  $\mu\text{m}$  Durchmesser) aus Abbildung 5.2-7G: a) Eingangsbild, b) nach Haar-Faltung und Schwellenwertbildung werden mögliche Schmutzpositionen (weiß) an den Partikelstellen deutlich.



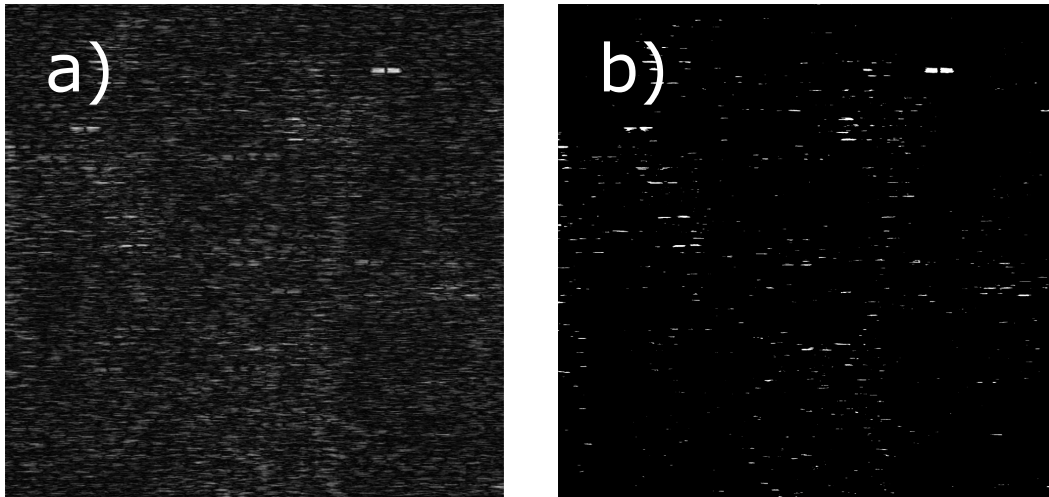


Abbildung 5.9: a) Haar-Transformation von Abbildung 5.6 b): Je heller, desto wahrscheinlicher ist Schmutz anwesend. b) nach der Schwellenwertbildung.

beiden Hauptkomponenten des Schmutzindex' leicht verfügbar: der verschmutzte Flächenanteils sowie das Verhältnis der mittleren absoluten Abweichungen, also das Intensitätsverhältnis von extremen zu nichtextremen Punkten in der Filterantwort (siehe auch Gleichung 3.2). Durch Anpassung der Parameter lässt sich die Schwellenwertbildung prinzipiell auch an andere, insbesondere höhere Verschmutzungsgrade abstimmen.

Bei Betrachtung des Rotkanals lässt sich feststellen, dass der Schmutzindex mit

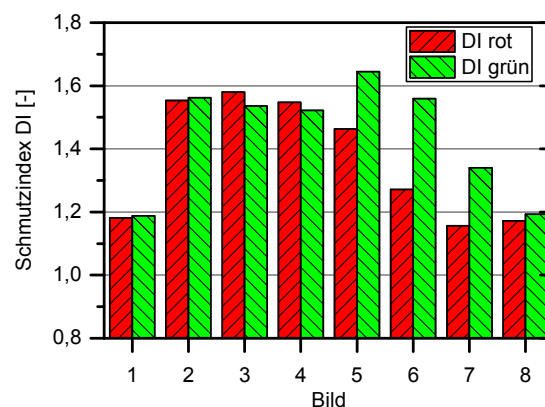


Abbildung 5.10: Auswertung des Reinigungsfortschritts der Bilderserie aus Abbildung 5.1 und 5.2 im Schmutzindex DI. Ein Wert von eins ist ideal sauber, ein Wert bis 1,2 wird hier als praktisch sauber gewertet.

fortschreitender Abreinigung gleichmäßiger abnimmt. Die Anschmutzung weist

keinen wesentlichen Helligkeitsunterschied gegenüber dem Filtertuch auf, dieser entsteht erst durch den Abzug des Hintergrundes mit der Graubilderosion mittels rollender Kugel (siehe Abschnitt 3.6.2). Die Haar-Transformation erkennt streng genommen auch keine schmutzigen Bereiche, sondern nur Übergänge zwischen sauber und schmutzig sowie umgekehrt. Das bedeutet auch, dass beim Bild mit der stärksten Verunreinigung (Abbildung 5.1-2R) im Wesentlichen der Rand des Schmutzflecks detektiert wird, nicht der Schmutz selbst. Trotz allem wird das Bild korrekt als unsauber klassifiziert. Falls dies überhaupt ein Problem darstellen sollte, ist es allenfalls ein kleiner Preis dafür, dass für die korrekte Funktion dieses in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Algorithmus kein Bild und keine Information über ein unverschmutztes Tuch notwendig ist.

Das unbenutzte sowie das schließlich abgereinigte Tuch werden zutreffend als sauber erkannt ( $DI < 1,2$ ; siehe Abbildung 5.10), ebenso die schmutzigen als unsauber ( $DI > 1,2$ ), mit Ausnahme des letzten Reinigungsschrittes (Abbildung 5.2-7R). Hier lagen nur noch sehr wenige Einzelpartikel vor, die bei hohem Kontrast (hier im Grünkanal) jedoch noch erkannt wurden. Von dieser kleinen Einschränkung abgesehen liefern damit die Auswertungen der beiden verschiedenen Farbkanäle gleichwertige Ergebnisse. Damit konnte auch gezeigt werden, dass die vorgestellte Methode nicht auf einen farblichen Kontrast zwischen Verschmutzung und Tuch angewiesen ist.

## 5.4 Rechengeschwindigkeit

Für Testläufe wurde der vorgestellte Algorithmus in Matlab umgesetzt (R2017a, unter Windows 8.1) und auf einem Arbeitsplatzrechner ausgeführt (Pentium Core i7-4790K bei 4.0 GHz mit 16 GB Arbeitsspeicher).

### 5.4.1 Zeitbedarf der einzelnen Rechenschritte

Da der vorgestellte Algorithmus aus mehreren Funktionsblöcken besteht, soll untersucht werden, wie groß ihr Anteil am Gesamtrechenzeitbedarf ist. Damit können Programmverbesserungen gezielter an den besonders zeitintensiven Schritten erarbeitet oder, falls möglich, diese gegebenenfalls übersprungen oder verschlankt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Der aufwändigste Einzelschritt liegt in der Hintergrundsubtraktion. Bei ausreichendem Kontrast zwischen Tuch und Schmutz oder nur mäßigen Hygieneanfor-

Tabelle 5.1: Zeitbedarf in der Bildauswertung nach Auswerteschritt.

Auswerteschritt	Zeitbedarf [ms]	
	Mittelwert	Standardabweichung
Gesamtablauf	1761	37
<i>davon:</i>		
- Hintergrundsubtraktion	1304	34
- Periodizitätserkennung	147	2
- Haar-Faltung	136	3
- Schmutzerkennung	172	1

derungen könnte dieser Schritt gegebenenfalls übersprungen werden, um den Programmablauf zu beschleunigen. Obwohl dies die ursprüngliche Zielformulierung etwas überschreitet, könnte durch multispektrale Infrarotüberwachung ein ausreichender Bildkontrast gewährleistet werden. Ohne die Hintergrundsubtraktion lief die Bildauswertung auf den über neun Megapixel großen Bildern in weniger als 500 Millisekunden, also noch in Echtzeit.

Die erst mit großem Abstand zu erreichende zweitaufwändigste disputable Operation ist die Erkennung der Periodizität. Wenn die Bildaufnahme sehr zuverlässig installiert ist, könnte die Überlegung angestellt werden, die Periodizitätserkennung nur an wenigen Aufnahmen des Filtertuchs durchzuführen. Dies ist jedoch sehr empfindlich gegenüber möglichem Falten-, beziehungsweise eher Wellenwurf des Tuchs. Es müsste dafür fest eingespannt sein und dürfte sich während der Benutzung weder dehnen, setzen noch weiten. Die Haar-Faltung und das dafür genutzte Integralbild stellen einen weiteren Schritt in der Berechnung dar. Er ist grundlegend für die Funktion des Algorithmus, ebenso die statistische Auswertung der Filterantwort. Den Schmutzindex auszurechnen kostet dann nur noch wenige Millisekunden.

### 5.4.2 Einfluss der Bildgröße

Um den Einfluss der Bildgröße darzustellen, wurde das Eingangsbild unterschiedlich beschnitten: in der Länge, in der Breite, sowie zu Quadraten. Die jeweilige Auswertedauer skalierte linear mit der Bildfläche (siehe Abbildung 5.11). Das Bild größer zu rastern wirkt sich auf die erkannte Periodenlänge (in Pixeln) aus. Dies erklärt den dabei beobachteten geringen Zeitgewinn.

Zur weiteren Beschleunigung könnte der Algorithmus in C/C++ oder einer ver-

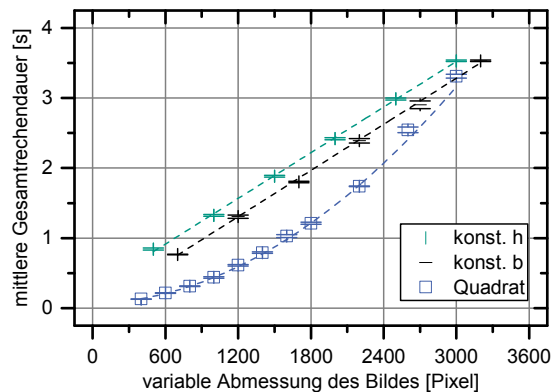


Abbildung 5.11: Bedarf an Rechenzeit zur Auswertung der unterschiedlich beschnittenen Bilder Aus Abbildung 5.1 und 5.2 bei konstanter Höhe von 3000 Pixeln oder konstanter Breite von 3200 Pixeln.

gleichbar schnellen Sprache umgesetzt, Rechenoperationen auf eine Grafikkarte übertragen und eventuell ein geeigneterer Rechner verwendet werden.

## 5.5 Vergleich mit anderen Methoden

Asha et al. [107] schlugen vor, Periodizitäten aus kompletten Bildern zu errechnen. Tatsächlich genügen wenige Bildzeilen (oder -spalten), selbst bei starker Verunreinigung. Hier beschleunigte die Berücksichtigung von nur fünf bis zehn Zeilen den entsprechenden Schritt fast um den Faktor 200. Mit nur eindimensionaler Haar-Filterung fortzufahren erspart die Notwendigkeit, die Periodizität in der zweiten Raumrichtung zu berechnen.

Die überwachte und geregelte Reinigung von Behälterwänden, wie sie Majschak et al. beschreiben [89, 90], konnte auf texturierte Filtertuchoberflächen übertragen werden. Während die Überwachung der Behälterreinigung auf der Autofluoreszenz organischer Verschmutzung auf inaktiver Edelstahloberfläche und der simplen Helligkeitsüberwachung basiert, liefert der neue Vorschlag eine umfassendere Lösung zur Partikelerkennung auf fast regelmäßig texturierten Oberflächen. Ein optischer Kontrast zwischen Schmutz und Oberfläche ist dabei hilfreich, aber keinesfalls erforderlich.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick auf zukünftige Arbeiten<sup>1</sup>

### 6.1 Bedarfsgerechte Auswahl technologischer Oberflächen

Das Anhaftungsverhalten von Weizenteig auf den Edelstahlblechen und den Förderbändern zeigte, dass speziell ebene Flächen besonders fest verkleben. Die Texturierung auf den Förderbändern senkte nicht nur das Haftvermögen, sondern ließ auch die Ablösung deutlich zuverlässiger stattfinden, was an den verringerten Streubreiten abzulesen ist. Somit ist die Forderung nach möglichst glatten Oberflächen mit geringer Rauheit nicht zielführend, was ihre Möglichkeit der Reinigung betrifft. Auch Mehlpartikel ließen sich leichter von rauen Blechen entfernen als von glatten. Zur verlässlichen Teigablösung erwiesen sich zahlreiche und gleichmäßig verteilte Luftpolster und damit einhergehend Dreiphasengrenzen als wesentlich. Bei hypothetischen Oberflächen mit Lotoseffekt müsste auf eine sehr feine Texturierung geachtet werden, damit sich auch keine den Teig verderbenden Mikroorganismen absetzen und in der Struktur der vergrößerten Oberfläche einlagern können. Noch dringlicher ist jedoch das Augenmerk auf die Benetzbarkeit des Basismaterials zu lenken: Sollte es besonders hydrophob sein, so drängte es lipophile Teigbestandteile, beispielsweise Eiweißkomponenten, in engeren Kontakt mit der Oberfläche und würde deren Anhaftung verstärken. Auch der bei den Baumwolltüchern beobachtete Effekt, nach längerer Kontaktzeit die gemessene Haftspannung zu reduzieren, ginge verloren, wenn die mobile wässrige Phase des Teigs nicht in die Grenzfläche zum Substrat hin gezogen würde. Eine im Gegensatz allzu hydrophile Oberfläche würde wässrige Flüssigphasen anziehen und festhalten und böte damit Mikroorganismen ein wirtliches Habitat. Vor allem Bakterien benötigen zum Wachsen eine feuchtere Umgebung als Pilze, ihre Häufigkeit und ihr Artenreichtum würden erheblich zunehmen.

Textile Gärtücher bieten von sich aus die gleichmäßig verteilten Dreiphasengrenzen und zusätzlich eine gewisse Luftpermeabilität. Diese liefert zwei wesentliche Vorteile: zum einen gewährleistet sie den Nachstrom von Luft beim Ablösen des Teiges, selbst wenn die Vertiefungen des Tuchs mit Verschmutzungen gefüllt sind. Bei den texturierten Förderbandmaterialien würde dieser in den Näpfen sitzende

---

<sup>1</sup>Dieses Kapitel nutzt Gedanken aus den Veröffentlichungen [2, 3, 74, 75].

Schmutz die Luft verdrängen und das dichte Kunststoffsubstrat verhindert ein Nachströmen. Damit gingen die vorteilhaften Dreiphasengrenzen verloren. Zum anderen erlaubt die Luftpermeabilität auch die Dampfdiffusion und ein gewisses Abtrocknen und verhindert dadurch die Akkumulation von Schwitzwasser, in dem sich Bakterien zügig vermehrten, aber auch der Teig aufweichte und damit noch klebriger und anhaftender würde.

Auch die partikulären Verunreinigungen ließen sich von allen untersuchten Tüchern leichter entfernen als von den Edelstahlblechen. Diese Beobachtungen geben der handwerklich-traditionellen Bäckerei Recht in der Verwendung von textilen Gärtüchern. Auch das unkorrelierte Verhalten der Baumwolle während ihrer Alterung unter chemischem Einfluss bezüglich der Teighaftung bestätigt scheinbar den traditionellen Praktiker, da sich diese Tücher ja nicht nachvollziehbar verschlechtern. Das umfassendere Bild entsteht beim systematischen Vergleich der beiden Tuchmaterialien Baumwolle und Polyester unter auch nicht-chemischer Alterung. Dann wird nämlich deutlich, dass die baumwollhaltigen Oberflächen im praktischen Einsatz sehr wohl Schaden nehmen, bereits marktgängige Polyestertücher ihren Gebrauchswert allerdings steigern können. Dass sie dabei, insbesondere bei der Abreinigbarkeit von Mehlpartikeln, von einem niedrigeren Niveau aus starten, könnte durch den kompletten Verzicht auf Streumehl und eine verbesserte Behandlung der Tücher ausgeglichen werden.

## 6.2 Behandlung der Tücher während der Nutzung

Diese Behandlung bezieht sich vor allem auf das Bürsten, das die Haarigkeit steigert und sich auch in der Vergrößerung der extremen Spitzenhöhe  $S_{xp}$  äußert. Ein verbessertes Gärtuch wiese also eine geeignete Länge der Einzelfasern auf und gewährleistete gleichzeitig ihre partielle Herauslösbarkeit. Damit blieben sie einerseits mit dem Garn fest verbunden, andererseits bildeten sie eine dichte und hohe Haarigkeit aus, welche die Teigablösung erleichtert. Damit diese im Einsatz erhalten bleibt, sollte insbesondere das Fasermaterial eine ausreichende biochemische Beständigkeit gegenüber den Einflüssen des Teiges und den nachgewiesenen Mikroorganismen besitzen. Außerdem scheint es sinnvoll, durch regelmäßiges Bürsten im Betrieb eventuelle Anhaftungen grob zu entfernen und vor allem die Haarigkeit wieder aufzurichten und aufzufrischen. So lassen sich der vorteilhafte hohe Profilspitzenanteil und die extreme Spitzenhöhe durchgängig aufrechterhalten.

### 6.3 Flächenanteil versus Höhe der Profilspitzen

Nimmt man alle Haftspannungen aus den Versuchen mit gebürsteten und gewaschenen Tüchern zusammen und betrachtet sie vor dem Hintergrund des Flächenanteils ihrer Profilspitzen  $S_{mr1}$ , so fallen sämtliche Ergebnisse unter einen abfallenden Grenzwert: Mit größerem Spitzenanteil erreichen die Tücher materialabhängig immer niedrigere Haftspannungen (siehe Abbildung 6.1). Vermutlich drücken sich die Profilspitzen, wenn sie auf weniger Fläche vorhanden und damit vergleichsweise spitzer und schlanker sind, tiefer in den Teig und verstärken so den Zusammenhalt. Mehr Spitzenanteil kann im Gegensatz die Last gleichmäßiger verteilen und schafft dabei beim Einsacken weniger neue vertikale Kontaktfläche zum Teig. Gleichzeitig bleiben Luftpolster und Dreiphasengrenzen in der Kontaktzone erhalten, die das Ablösen zuverlässig erleichtern. Es liegt also kein Widerspruch darin,  $S_{mr1}$  – ein reines Maß der Spitzen – und  $S_{xp}$  – das einen größeren Bereich miteinbezieht – zu beachten: Ersteres zeigt über seinen Flächencharakter ein Potential zur mechanischen Lastaufnahme und –verteilung, letzteres weist durch seinen Höhencharakter auf die Möglichkeit des Teiges, sich auf dem Oberflächenprofil zu deformieren und zwischen den Spitzen des Oberflächenprofils einzusacken, ohne dabei neue, zusätzliche Kontaktfläche zum Tuch zu schaffen. Ein vergleichbar klarer Zusammenhang zwischen der Haftspannung und  $S_{mr1}$  konnte bei den neuen Tüchern nicht beobachtet werden.

In der Studie zur Tuchalterung unterschieden sich die einzelnen Versuchsobjek-

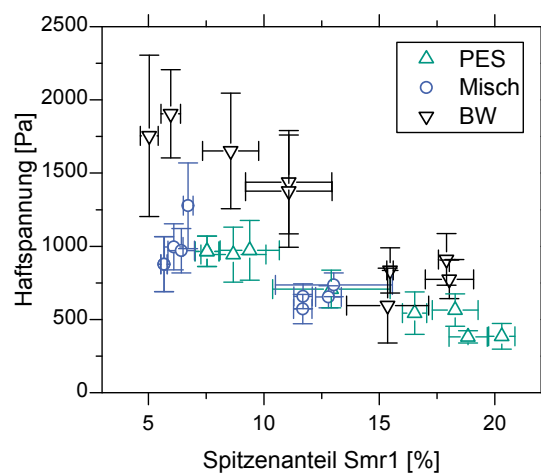


Abbildung 6.1: Teighaftung an gealterten Gärtüchern nach deren Spitzenanteil  $S_{mr1}$  (1 Minute Kontakt).

te untereinander. Jedes Tuch für sich betrachtet zeigte jedoch Messergebnisse, die durch individuelle Ausgleichsgeraden gut angenähert werden konnten. Da diese sowohl unterschiedliche Steigungen als auch verschiedene Ordinatenabschnitte aufweisen, ist der beobachtete Zusammenhang zwischen dem Spitzenanteil und der Haftspannung ursächlich vermutlich auf mehrere Einflussfaktoren zurückzuführen. Deshalb ist davon auszugehen, dass der Zusammenhang zum einen webartspezifisch ist, da die Webart sich definitiv auf die mechanischen Oberflächeneigenschaften auswirkt, zum anderen aber auch das Material eine Rolle spielt. Auch dieses kann sich auf die Oberflächenparameter und damit die Profilspitzen auswirken. Hinzu kommt die chemische Andersartigkeit, die sich im Benetzungsverhalten zum Teig hin widerspiegelt.

## 6.4 Gestaltung haftkraftoptimierter Gärtücher

Um die Ablösung von Mehlpartikeln zu erleichtern, sollten die Profiltäler gemäß ISO 25178-2 vermieden oder sogar ganz entfernt werden. Dies betrifft sowohl ihre Tiefe als auch ihren Flächenanteil. Dadurch wird ihnen der Raum genommen, sich in die Oberfläche einzulagern und in Zwickeln zu verklemmen. Um die Teighaftung zu mindern, erwies es sich als zielführend, den Messparameter der extremen Spitzenhöhe  $S_{xp}$  hoch zu halten. Dadurch wird dem aufliegenden Teig vermutlich mehr Raum zur Relaxation gegeben, ohne dass er zusätzliche Kontaktflächen mit tiefer gelegenen Profilstrukturen ausbildet. Ein vergrößerter Flächenanteil der Profilspitzen  $S_{mr1}$  schien hierbei weniger entscheidend. Er trat nur im Alterungsprozess des einzelnen Tuchs als positiv in Erscheinung.

Von der theoretischen Herleitung aus ist die Haarigkeit als direkt greifbare Eigenschaft des Tuchs von übergeordneter Bedeutung. Eine ausreichende Dichte vorausgesetzt, verteilt ein längerer Oberflächenflaum die Haftarbeit auf eine größere Strecke und senkt dadurch die scheinbare Haftspannung. Der praktische Kompromiss wird zwischen der Dichte der abstehenden Einzelfasern und ihrer dem Teig zugänglichen Länge abwägen müssen.

Ein neues Gärtuch sollte vor seinem ersten Einsatz bereits eine geeignete Haarigkeit aufweisen. Diese Oberflächenerscheinung sollte dann aber auch über die gesamte Lebensdauer des Tuchs anhalten. Das heißt, die herausstehenden Einzelfasern sollten zuallererst möglichst dauerbiegefest und elastisch sein, dass sie also nicht reißen oder brechen. Verschleiß in der Haarigkeit sollte anschließend



durch eine Oberflächenbehandlung, beispielsweise Bürsten, im Betrieb kontinuierlich kompensiert werden. Dazu müsste das Garn so beschaffen sein, dass seine Einzelfasern in der Basis fest eingebunden sind, ihre Enden sich allerdings durch die mechanische Oberflächenbehandlung langsam herauslösen lassen. Dann können sie als neue Haarigkeit abstehen, bleiben aber dem Tuch fest verbunden.

Bezüglich der Werkstoffwahl hatte die Baumwolle den niedrigeren Mehrrückhalt, was vermutlich auf die unregelmäßige, mikrostrukturierte Textur der Einzelfasern zurückzuführen ist. Der große Nachteil der Baumwolle liegt in ihrer mangelhaften biochemischen Beständigkeit. Im Idealfall gelänge es, ihre Kräuselstruktur durch ein geeignetes Verfahren der Texturierung auch in der gegebenen Feingliedrigkeit auf eine biochemisch stabilere Chemiefaser zu übertragen. Mit ihr und den angeführten Gestaltungszielen ist es einem Textilingenieur hoffentlich möglich, ein optimiertes Gärtuch zu konstruieren.

## 6.5 Zeitabhängigkeit der Kontaktspannung

Messungen am Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie, zeigten, dass die Kontaktdauer des Teiges eine wesentliche Einflussgröße für das Adhäsionsverhalten darstellt [12]. Für kurze Kontaktdauern gelten die hier vorgestellten Zusammenhänge mit den mechanischen Oberflächeneigenschaften uneingeschränkt. Nach längerem Kontakt jedoch dominieren die chemischen Oberflächeneigenschaften, also die Oberflächenenergie und ihre Zusammensetzung aus polaren und dispersen Anteilen. Die Kontaktzeit von einer Minute ist als kurz zu betrachten, lang wird sie nach spätestens zehn Minuten [12]. Dort wurden Zeiten bis zu zwei Stunden betrachtet. Von den kommerziellen Oberflächen war nur bei den sehr definiert und stark texturierten Förderbändern auch nach langen Kontaktzeiten noch ein deutlicher Einfluss der mechanischen Eigenschaften ersichtlich. Für diese längeren Kontaktzeiten sind also auch die Ergebnisse nach Laukemper [12] zur Optimierung der Oberflächen zu berücksichtigen. Sollte es gelingen, Gärtücher im Sinne der Haftkraftoptimierung ausreichend stark zu texturieren, so ist auch bei derartigen Oberflächen eine Auswirkung der mechanischen Gestaltung auf die Haftspannung nach längerem Kontakt zu erwarten.

## 6.6 Gebrauchsdauer und Reinigungszyklen von Gärtüchern

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit verdeutlichen, wie schädlich das Waschen für die Oberfläche der Gärtücher sein kann, denn es reduzierte die haftkraftsenkende Haarigkeit und ließ an ihrer Stelle minderwertige Knötchen entstehen (siehe Abschnitt 4.4.1). Andererseits ist die Wäsche die einzige Möglichkeit, eingelagerte Verunreinigungen und insbesondere mikrobielle Belastung gründlich zu entfernen. Um diesen Zielkonflikt zu vermeiden, beziehungsweise möglichst weit aufzuschieben, sollte zum einen die Anschmutzung der Tücher möglichst gering gehalten werden. Hierzu dienen haftkraftreduzierte Oberflächen in der gesamten Produktionsstrecke, die auch den kompletten Verzicht auf Streumehl erlauben. Zum anderen sollte die Häufigkeit der Tuchwäsche auf ihre tatsächliche Notwendigkeit reduziert werden, was die Belastung auf das Tuch minderte. Hierfür ist genaues Wissen über den Zustand des Tuchs grundlegend. Die hygienische Erfordernis erwächst aus der mikrobiellen Belastung, sie kann aus einer Bewuchskinetik abgeleitet werden. Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit bei Laukemper et al. gefundenen Wachstumsraten basieren auf dem konventionellen Einsatz der Gärtücher [12, 13]. Bei regelmäßigem Abbürsten könnten sie sich verlangsamen, wenn mit den Teiganhaftungen auch das Nährmedium der Mikroorganismen entfernt wird. Die prozesstechnische Erfordernis zur Tuchwäsche ergibt sich aus dem verschlechterten Adhäsionsverhalten des Textils, wenn seine Oberfläche von Verschmutzungen belegt wird.

## 6.7 Prozessintegrierte Zustandsüberwachung von Gärtüchern

Die beschriebene bildanalytische Überwachung (siehe Abschnitte 3.6.2 und 5) erkennt Partikel, Anlagerungen und Fremdkörper auf Textilien auch ohne farblichen Kontrast. Daher bietet sich diese Methode auch zur direkten Inspektion der Gärtücher an. Denkbar wäre die Installation des Überwachungssystems im Verfahrensablauf direkt anschließend an die Beschickung des Backofens, wenn die Gärtücher also gerade von den Teiglingen befreit wurden. Die Menge eventueller Anhaftungen könnte dann die Intensität der anschließenden Bürstreinigung bestimmen. Im Fall zu intensiver oder persistierender Verschmutzung könnten die Tücher der gründlichen Wäsche zugeführt werden. Diese Kontrolle des Hygiene-

zustandes könnte sowohl zum verbesserten Gesundheitsschutz des Verbrauchers als auch - vom prozesstechnischen Aspekt aus betrachtet - zu geringerer Störanfälligkeit der Produktionslinie führen. Ferner können die Aufzeichnungen dem Nachweis der Unbedenklichkeit und guter Herstellungspraxis gegenüber den Aufsichtsbehörden, Auftraggebern aus dem Einzelhandel und den Endverbrauchern dienen. Die Orientierung am tatsächlichen Reinigungsbedarf maximiert in jedem Fall die Einsatz- und Lebensdauer der Gärtücher. Dadurch wird die Umwelt entlastet, aber auch die Kostenstruktur der Bäckerei verbessert.

## 6.8 Bildüberwachung zur innovativen Filtertuchreinigung

Es wurde ein Algorithmus vorgestellt, der partikuläre Verunreinigungen auf gewebten Tüchern erkennt. Er erfordert kein Vorwissen über Farben, Helligkeiten, Kontraste oder die Abmessungen des Webmusters. Damit besteht ein intelligentes und anpassungsfähiges System mit sehr weiten Einsatzmöglichkeiten. Seine objektive Erfassung des hygienischen Istzustandes in Echtzeit erlaubt die kostengünstige Überwachung von Prozesseinrichtungen, die Maximierung von Standzeiten, beispielsweise der Gärtücher, oder die Beschreibung eines Reinigungsfortschritts. Hiermit wäre ein anwendungsnahes, neuartiges Werkzeug geschaffen, mit dem CIP-Reinigungen extrem effizient, in Echtzeit und in situ validiert werden könnten; dies spart wertvolle Entwicklungszeit ein. Besonders erstrebenswert erscheint es jedoch, mittels der beschriebenen Analysemethode einen Reinigungssensor zu entwickeln, der eine Tuchreinigung bedarfsgerecht in ihrer Intensität regeln kann. Er wird wahrscheinlich leicht in bestehenden Reinigungsanlagen nachzurüsten sein und ihren Einsatz wirtschaftlicher und gleichzeitig zuverlässiger gestalten. [74]

In das Programm können jederzeit Module oder Ergänzungen eingearbeitet werden, um die Berechnungen dadurch zu vereinfachen oder auch zu beschleunigen. Auch eventuell vorhandenes Vorwissen über Tuch und Verunreinigungen können dabei ausgenutzt werden. Ansätze zur Weiterentwicklung und selektiveren und sensitiveren Gestaltung der Bildauswertung mit spezifischeren Deskriptoren wurden aufgezeigt. Bei gegebenem optischem Kontrast zwischen Tuch und Partikeln erkennt der vorgestellte Algorithmus zuverlässig Einzelpartikel und klassifiziert das zu untersuchende Testobjekt damit korrekterweise als kontaminiert. Mit der Testimplementierung in Matlab erreichte die Analyse Echtzeittempo bei Bildern von über zwei Megapixeln. In der vereinfachten Ausführung gelang dies auch bei

einer Bildgröße von über neun Megapixeln sogar auf einem gewöhnlichen Arbeitsplatzrechner. In einer schnelleren Programmiersprache und auf einem besser geeigneten Computersystem, eventuell mit Rechnungen auf der Grafikkarte, ermöglicht diese Bildauswertung die bedarfsgerechte Reinigung von gewebten Tüchern. Dies bedeutet einen großen Schritt vorwärts zum saubereren, sichereren und umweltfreundlicheren Einsatz unterschiedlichster Apparate mit gewebten Tüchern als funktioneller Oberfläche, zum Beispiel bei Filterapparaten (kontinuierlicher Bandfilter, chargenweise Filterpresse), oder Gärtüchern.

# Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

Symbol	Dimension	Bezeichnung
$A$	$M L^2 T^{-2}$	Hamakerkonstante
$A_{Extrema}$	$L^2$	Flächenanteil der Extremwerte
$A_K$	$M^2$	Kontaktfläche
$C$	$M L^8 T^{-2}$	Wechselwirkungskoeffizient
$d$	<i>Pixel</i>	Vorwärtsdistanz
$d_1, d_2$	L	Länge der Halbachsen der Teigkontaktfläche
$D$	L	Abstand
$DI$		Schmutzindex
$f$		Helligkeit eines Bildpunktes
$F$	$M L T^{-2}$	Van-der-Waals-Kraft
$F_A$	$M L T^{-2}$	Haftkraft
$F_{Kap}$	$M L T^{-2}$	Kapillarkraft
$g$		Grauwert
$H_0$	L	Mindestkontaktdistanz
$k$		Ganzzahlwert
$l$	L	Messstrecke
$m$	M	Probenmasse
$maA_{Extrema}$		mittlere absolute Abweichung der Extrema vom Mittelwert
$maA_{Zentrum}$		mittlere absolute Abweichung der mittlernäheren Werte vom Mittelwert
$p_k$	$M L^{-1} T^{-2}$	Sättigungsdampfdruck über der gekrümmten Oberfläche
$p_r$	<i>Pixel</i>	Periodizität
$p_v$	$M L^{-1} T^{-2}$	Sättigungsdampfdruck über der ebenen Oberfläche

Symbol	Dimension	Bezeichnung
$r$	L	Rauheitsradius
$r_1, r_2$	L	Hauptkrümmungsradien
$r_Z$	L	Bahnradius in der Zentrifuge
$R, R_1, R_2$	L	Kugelradius
$Ra$	L	arithmetische Mittelrauheit
$R_{eff}$	L	Effektivradius
$R_m$	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$	Gaskonstante
$Rq$	L	quadratische Mittelrauheit
$s_1, s_2$	L	Strecke 1, Strecke 2
$T$	$\Theta$	absolute Temperatur
$V_m$	$L^3 N^{-1}$	molares Volumen
$x$	L	Strecke, Koordinate
$Z$	L	Ordinatenwert
$\gamma$	$M L^{-1} T^{-2}$	Oberflächenenergie
$\delta$	<i>Pixel</i>	Vorwärtsdistanz
$\Delta\Lambda_r$		zweite horizontale Vorwärtsdifferenz eines zweidimensionalen Bildes
$\epsilon$	<i>Pixel</i>	Versatz, Subpixelfehler
$\theta$	<i>Winkel</i>	Kontaktwinkel
$\lambda$		Vorwärtsdifferenz
$\Lambda_r$		horizontale Vorwärtsdifferenz eines zweidimensionalen Bildes
$\rho_1, \rho_2$	$L^{-3}$	Atomdichte
$\sigma$	$M L^{-1} T^{-2}$	Oberflächenspannung
$\sigma$		Standardabweichung
$\sigma_Z$	$M L^{-1} T^{-2}$	Zugspannung
$\omega$	$T^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit

**Weitere Indizes**

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
1, 2	Körper, Stoff oder Konfiguration 1, 2
12	zwischen Körper 1 und 2
<i>d</i>	dispenser Beitrag
<i>i</i>	Zählindex
<i>j</i>	Zählindex
<i>l</i>	zwischen Flüssigphase und Gasphase
<i>M</i>	Bildhöhe
<i>N</i>	Bildbreite
<i>p</i>	polarer Beitrag
<i>r</i>	Zeile
<i>s</i>	zwischen Feststoff und Gasphase
<i>sl</i>	zwischen Feststoff und Flüssigphase

## Abkürzungen

AFM	Atomic Force Microscope
BW	Baumwolle
CLSM	konfokales Laser-Raster-Mikroskop
DMT	Derjaguin, Müller und Toporov
HoG	Histogramme orientierter Gradienten
HSV	Hue, Saturation, Value
JKR	Johnson, Kendall und Roberts
Leinw.	Leinwandbindung
PTFE	Polytetrafluorethen
PVDF	Polyvinylidendifluorid
PVC	Polyvinylchlorid
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
RGB	Rot, Grün, Blau
RMS	Root Mean Square
RZB	relative Zentrifugalbeschleunigung
Sa	arithmetische Mittelrauheit
Sk	Kernhöhe (gemäß [21])
Smr1	Flächenanteil der Profilspitzen (gemäß [21])
Smr2	Flächenanteil von Kern und Spitzen (gemäß [21])
Spk	reduzierte Spitzenhöhe (gemäß [21])
Sq	quadratische Mittelrauheit
SURF	Speeded Up Robust Features
Svk	reduzierte Taltiefe (gemäß [21])
Sxp	maximale Spitzenhöhe (gemäß [21])
TPA	Texture-Profile-Analyzer
TPO	thermoplastischem Olefin
TPU	thermoplastischem Polyurethan



## Literaturverzeichnis

- [1] CEN. Nahrungsmittelmaschinen - allgemeine gestaltungsleitsätze - teil 2: Hygieneanforderungen; deutsche fassung en 1672-2:2005+a1:2009, 2009-07.
- [2] Richard-Sebastian Moeller, Arvid Duchardt, and Hermann Nirschl. Ageing proving cloths – effects on surfaces and usability. *Journal of Food Engineering*, 214:218–225, 2017. ISSN 02608774. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.07.001.
- [3] Richard-Sebastian Moeller and Hermann Nirschl. Adhesion and cleanability of surfaces in the baker’s trade. *Journal of Food Engineering*, 194:99–108, 2017. ISSN 02608774. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.09.012.
- [4] Thomas Miedaner. *Kulturpflanzen: Botanik – Geschichte – Perspektiven*. Springer Science and Business Media, Place of publication not identified, 2014. ISBN 978-3-642-55293-9. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=878351>.
- [5] *Starch - Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2000. ISBN 3527306730. doi: 10.1002/14356007.
- [6] H. Zheng, M.P Morgenstern, O.H Campanella, and N.G Larsen. Rheological properties of dough during mechanical dough development. *Journal of Cereal Science*, 32(3):293–306, 2000. ISSN 07335210. doi: 10.1006/jcrs.2000.0339.
- [7] Filip van Bockstaele, Ingrid de Leyn, Mia Eeckhout, and Koen Dewettinck. Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the visco-elastic properties of wheat flour dough. *Journal of Food Engineering*, 107(1):50–59, 2011. ISSN 02608774. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.06.001.
- [8] B. J. DOBRASZCZYK. The rheological basis of dough stickiness. *Journal of Texture Studies*, 28(2):139–162, 1997. ISSN 0022-4901. doi: 10.1111/j.1745-4603.1997.tb00108.x.
- [9] Walter Freund. *Verfahrenstechnik Brot + Kleingebäck*, volume 5 of *Bäckerei-Konditorei-Management*. Gildebuchverl., Alfeld, 1. Aufl. edition, 1995. ISBN 3-7734-0134-5.

- [10] DIN. Mahlerzeugnisse aus getreide - anforderungen, typen und prüfung, 2017-11.
- [11] Serge Pérez and Eric Bertoft. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch - Stärke*, 62(8):389–420, 2010. ISSN 00389056. doi: 10.1002/star.201000013.
- [12] Rita Laukemper. Time-dependent adhesion behavior of dough – relation to surface structure, surface energy and microbial contamination, Oktober 2016.
- [13] Rita Laukemper, Ana Maria Giraldo, Silke Hofmann, and Margit Jekle. Microbial contamination and surface properties of proofing carrier cloths after a long-term use: accepted manuscript. *cereal technology*, 2018.
- [14] Europäisches Parlament und der Rat. Verordnung (eg) nr. 178/2002. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32002R0178>.
- [15] Carel J. van Oss, Manoj K. Chaudhury, and Robert J. Good. Interfacial lifshitz-van der waals and polar interactions in macroscopic systems. *Chemical Reviews*, 88(6):927–941, 1988. ISSN 0009-2665. doi: 10.1021/cr00088a006.
- [16] H. C. Hamaker. The london—van der waals attraction between spherical particles. *Physica*, 4(10):1058–1072, 1937. ISSN 00318914. doi: 10.1016/S0031-8914(37)80203-7.
- [17] E. M. Lifshitz. The theory of molecular attractive forces between solids. *SOVIET PHYSICS JETP*, 2(1):73–83, 1956.
- [18] I. E. Dzyaloshinskii, E. M. Lifshitz, and Lev P. Pitaevskii. General theory of van der waals’ forces. *Soviet Physics Uspekhi*, 4(2):153–176, 1961. ISSN 0038-5670. doi: 10.1070/PU1961v004n02ABEH003330. URL <http://iopscience.iop.org/0038-5670/4/2/R01>.
- [19] B. Derjaguin. Untersuchungen über die reibung und adhäsion, iv. *Kolloid-Zeitschrift*, 69(2):155–164, 1934. doi: 10.1007/BF01433225.

- [20] Hans Rumpf. *Mechanische Verfahrenstechnik*. Hanser, München, 1975. ISBN 3-446-11987-6.
- [21] ISO. Geometrische produktspezifikation (gps) - oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - teil 2: Begriffe und oberflächen-kenngößen (iso 25178-2:2012); deutsche fassung en iso 25178-2:2012, 2012-09.
- [22] Rabinovich, Adler, Ata, Singh, and Moudgil. Adhesion between nanoscale rough surfaces. *Journal of colloid and interface science*, 232(1):10–16, 2000. ISSN 1095-7103. doi: 10.1006/jcis.2000.7167.
- [23] J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson. Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 295(1442):300–319, 1966. ISSN 1364-5021. doi: 10.1098/rspa.1966.0242.
- [24] Aditya Kumar, Thorsten Staedler, and Xin Jiang. Role of relative size of asperities and adhering particles on the adhesion force. *Journal of colloid and interface science*, 409:211–218, 2013. ISSN 1095-7103. doi: 10.1016/j.jcis.2013.07.039.
- [25] J. F. Archard. Elastic deformation and the laws of friction. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 243 (1233):190–205, 1957. ISSN 1364-5021. doi: 10.1098/rspa.1957.0214.
- [26] Marcus Eber. *Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit von nanoskaligen Fließregulierungsmitteln*. Würzburg, univ., diss., 2004.
- [27] Jürgen Hartmüller, Martin Rudolph, Rouven Weiler, and Siegfried Ripperger. Untersuchung der haftung zwischen pulverpartikeln und strukturierten oberflächen mithilfe der vibrationsmethode. *Chemie Ingenieur Technik*, 86 (3):341–346, 2014. doi: 10.1002/cite.201300040.
- [28] Claudius Weiler, Marc Egen, Michael Trunk, and Peter Langguth. Force control and powder dispersibility of spray dried particles for inhalation. *Journal of pharmaceutical sciences*, 99(1):303–316, 2010. ISSN 1520-6017. doi: 10.1002/jps.21849.

- [29] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 324(1558):301–313, 1971. ISSN 00804630.
- [30] B.V Derjaguin, V.M Muller, and Yu.P Toporov. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of colloid and interface science*, 53(2):314–326, 1975. ISSN 1095-7103. doi: 10.1016/0021-9797(75)90018-1.
- [31] Popov. *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-88836-9. doi: 10.1007/978-3-540-88837-6.
- [32] F. P. Bowden and D. Tabor. *The friction and lubrication of solids*. Oxford classic texts in the physical sciences. Oxford University Press, Oxford, 2001. ISBN 978-0-19-850777-2.
- [33] Charles W. Paul. Pressure-sensitive adhesives (psas). In Lucas F. M. da Silva, Andreas Öchsner, and Robert D. Adams, editors, *Handbook of Adhesion Technology*, pages 341–372. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-01168-9. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6{\textunderscore}15.
- [34] Lucas F. M. da Silva, Andreas Öchsner, and Robert D. Adams. *Handbook of Adhesion Technology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-01168-9. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [35] Habenicht. *Kleben*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-85264-3. doi: 10.1007/978-3-540-85266-7.
- [36] H. Rumpf. Grundlagen und methoden des granulierens. *Chemie Ingenieur Technik - CIT*, 30(3):144–158, 1958. doi: 10.1002/cite.330300307.
- [37] H. Rumpf. Grundlagen und methoden des granulierens. 3. teil: Überblick über die technischen granulierverfahren. *Chemie Ingenieur Technik*, 30(5): 329–336, 1958. doi: 10.1002/cite.330300510.
- [38] Helmar Schubert. Grundlagen des agglomerierens. *Chemie Ingenieur Technik*, 51(4):266–277, 1979. doi: 10.1002/cite.330510404.

- [39] Stieß. *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-32551-2. doi: 10.1007/978/3-540-32552-9.
- [40] Yakov I. Rabinovich, Joshua J. Adler, Madhavan S. Esayanur, Ali Ata, Rajiv K. Singh, and Brij M. Moudgil. Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness. *Advances in Colloid and Interface Science*, 96(1-3): 213–230, 2002. ISSN 00018686. doi: 10.1016/S0001-8686(01)00082-3.
- [41] Hans-Jürgen Butt and Michael Kappl. Normal capillary forces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 146(1-2):48–60, 2009. ISSN 00018686. doi: 10.1016/j.cis.2008.10.002.
- [42] D. Tabor and R. H. S. Winterton. The direct measurement of normal and retarded van der waals forces. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 312(1511):435–450, 1969. ISSN 1364-5021. doi: 10.1098/rspa.1969.0169.
- [43] Yasuhiro SHIMADA, Yorinobu YONEZAWA, Hisakazu SUNADA, Ryusei NONAKA, Kenzou KATOU, and Hiroshi MORISHITA. The development of an apparatus for measuring the adhesive force between fine particles. *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, 37(9):658–664, 2000. ISSN 0386-6157. doi: 10.4164/sptj.37.658.
- [44] Jacob N. Israelachvili. *Intermolecular and Surface Forces*. Elsevier Science, Saint Louis, 3rd ed. edition, 2015. ISBN 0-12-375182-9. URL <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4676134>.
- [45] B. V. Derjaguin and A. D. Zimon. Adhesion of particles of a powder to plane surfaces. *Kolloidn. Zh.*, 23(5):544–552, 1961.
- [46] E. Ermis, R. J. Farnish, R. J. Berry, and M. S. A. Bradley. Direct measurement of powder flavor adhesion onto crisp surface using a novel adhesion tester. *Particulate Science and Technology*, 27(4):362–372, 2009. ISSN 0272-6351. doi: 10.1080/02726350902994035.

- [47] Konrad Hein, Thomas Hucke, Michael Stintz, and Siegfried Ripperger. Analysis of adhesion forces between particles and wall based on the vibration method. *Particle & Particle Systems Characterization*, 19(4):269–276, 2002. ISSN 09340866. doi: 10.1002/1521-4117(200208)19:4<textless>269::AID-PPSC269<textgreater>3.0.CO;2-T.
- [48] Stefanie Wanka, Michael Kappl, Markus Wolkenhauer, and Hans-Jürgen Butt. Measuring adhesion forces in powder collectives by inertial detachment. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 29(52):16075–16083, 2013. ISSN 1520-5827. doi: 10.1021/la404014d.
- [49] Helmar Krupp. Particle adhesion theory and experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1(2):111–239, 1967. ISSN 00018686. doi: 10.1016/0001-8686(67)80004-6.
- [50] Morton Corn. The adhesion of solid particles to solid surfaces ii. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11(12):566–584, 1961. ISSN 0002-2470. doi: 10.1080/00022470.1961.10468039.
- [51] K. N. G. Fuller and D. Tabor. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 345(1642):327–342, 1975. ISSN 00804630.
- [52] G. R. Salazar-Banda, M. A. Felicetti, J.A.S. Gonçalves, J. R. Coury, and M. L. Aguiar. Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique. *Powder Technology*, 173(2):107–117, 2007. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2006.12.011.
- [53] Thanh T. Nguyen, Clinton Rambanapasi, Anne H. de Boer, Henderik W. Frijlink, Peter M. v. D. Ven, Joop de Vries, Henk J. Busscher, and Kees v. D. Voort Maarschalk. A centrifuge method to measure particle cohesion forces to substrate surfaces: The use of a force distribution concept for data interpretation. *International journal of pharmaceutics*, 393(1-2):88–95, 2010. ISSN 1873-3476. doi: 10.1016/j.ijpharm.2010.04.016.

- [54] A. DEBOER, P. HAGEDOORN, D. GJALTEMA, J. GOEDE, and H. FRIJLINK. Air classifier technology (act) in dry powder inhalationpart 1. introduction of a novel force distribution concept (fdc) explaining the performance of a basic air classifier on adhesive mixtures. *International journal of pharmaceuticals*, 260(2):187–200, 2003. ISSN 1873-3476. doi: 10.1016/S0378-5173(03)00250-3.
- [55] F. Podczeck, J. M. Newton, and M. B. James. The estimation of the true area of contact between microscopic particles and a flat surface in adhesion contact. *Journal of Applied Physics*, 79(3):1458–1463, 1996. ISSN 0021-8979. doi: 10.1063/1.360984.
- [56] F. Podczeck. The influence of constant and changing relative humidity of the air on the autoadhesion force between pharmaceutical powder particles. *International journal of pharmaceuticals*, 145(1-2):221–229, 1996. ISSN 1873-3476. doi: 10.1016/S0378-5173(96)04774-6.
- [57] Fridrun Podczeck. Investigations into the reduction of powder adhesion to stainless steel surfaces by surface modification to aid capsule filling. *International journal of pharmaceuticals*, 178(1):93–100, 1999. ISSN 1873-3476. doi: 10.1016/S0378-5173(98)00363-9.
- [58] E. Ermis, R. J. Farnish, R. J. Berry, and M.S.A. Bradley. Centrifugal tester versus a novel design to measure particle adhesion strength and investigation of effect of physical characteristics (size, shape, density) of food particles on food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 104(4):518–524, 2011. ISSN 02608774. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.01.008.
- [59] Johannes Knoll, Sebastian Knott, and Hermann Nirschl. Characterization of the adhesion force between magnetic microscale particles and the influence of surface-bound protein. *Powder Technology*, 283:163–170, 2015. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2015.05.028.
- [60] Johannes Knoll and Hermann Nirschl. Influence of the magnetic force on the van der waals force of superparamagnetic composite particles. *Powder Technology*, 259:30–36, 2014. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2014.03.050.

- [61] S. S. Heddleson, D. D. Hamann, D. R. Lineback, and L. Slade. Pressure-sensitive adhesive properties of wheat flour dough and the influence of temperature, separation rate, and moisture content. *Cereal Chemistry*, 71(6):564–570, 1994. URL [http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71\\_564.pdf](http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71_564.pdf).
- [62] W. Z. Chen and R. C. Hosney. Development of an objective method for dough stickiness. *LWT - Food Science and Technology*, 28(5):467–473, 1995. ISSN 00236438. doi: 10.1006/fstl.1995.0079.
- [63] S. M. Wang, B. M. Watts, O. M. Lukow, L. Schlichting, and W. Bushuk. Dough profiling: An instrumental method for dough stickiness measurement. *Cereal Chemistry*, 73(4):445–451, 1996. URL [http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1996/Documents/73\\_445.pdf](http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1996/Documents/73_445.pdf).
- [64] M. Jekle and T. Becker. Dough microstructure: Novel analysis by quantification using confocal laser scanning microscopy. *Food Research International*, 44(4):984–991, 2011. ISSN 09639969. doi: 10.1016/j.foodres.2011.02.036.
- [65] Dorra Ghorbel and Bernard Launay. An investigation into the nature of wheat flour dough adhesive behaviour. *Food Research International*, 64:305–313, 2014. ISSN 09639969. doi: 10.1016/j.foodres.2014.06.045.
- [66] T. Young. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95(0):65–87, 1805. ISSN 0261-0523. doi: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [67] Frederick M. Fowkes. Attractive forces at interfaces. *Industrial & Engineering Chemistry*, 56(12):40–52, 1964. ISSN 0019-7866. doi: 10.1021/ie50660a008.
- [68] D. K. Owens and R. C. Wendt. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 13(8):1741–1747, 1969. ISSN 00218995. doi: 10.1002/app.1969.070130815.
- [69] D. H. Kaelble. Dispersion-polar surface tension properties of organic solids. *The Journal of Adhesion*, 2(2):66–81, 2008. ISSN 0021-8464. doi: 10.1080/0021846708544582.



- [70] W. Rabel. Einige aspekte der benetzungstheorie und ihre anwendung auf die untersuchung und veränderung der oberflächeneigenschaften von polymeren. *Farbe und Lack*, 77(10):997–1006, 1971.
- [71] Robert N. Wenzel. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8):988–994, 1936. ISSN 0019-7866. doi: 10.1021/ie50320a024.
- [72] ISO. Geometrische produktspezifikationen (gps) - oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - nenneigenschaften von tastschnittgeräten (iso 3274:1996); deutsche fassung en iso 3274:1997, 1998-04.
- [73] ISO. Geometrische produktspezifikation (gps) - oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - benennungen, definitionen und kenngrößen der oberflächenbeschaffenheit (iso 4287:1997 + cor 1:1998 + cor 2:2005 + amd 1:2009); deutsche fassung en iso 4287:1998 + ac:2008 + a1:2009, 2010-07.
- [74] Richard-Sebastian Moeller. Optischer echtzeit-reinigungssensor zur bedarfsgerechten, geregelten reinigung von filtertüchern: (poster), 22.11.2017.
- [75] Richard-Sebastian Moeller and Hermann Nirschl. Optical dirt detection for a demand-controlled cleaning of woven filter cloth. *Separation and Purification Technology*, 207:336–343, 2018. ISSN 13835866. doi: 10.1016/j.seppur.2018.06.058.
- [76] *Gesundheit in Deutschland*. Gesundheitsberichterstattung des Bundes - Gemeinsam getragen von RKI und Destatis. Berlin, 2015. ISBN 978-3-89606-225-3.
- [77] H. Anlauf and H. Nirschl. Mechanische flüssigkeitsabtrennung in der lebensmittelverfahrenstechnik. *Chemie Ingenieur Technik*, 80(8):1035–1044, 2008. doi: 10.1002/cite.200800036.
- [78] Sarah Illies, Julian Pfänder, Harald Anlauf, and Hermann Nirschl. Filter cake compaction by oscillatory shear. *Drying Technology*, 35(1):66–75, 2017. ISSN 0737-3937. doi: 10.1080/07373937.2016.1159576.

- [79] Dennis R. Heldman. *Handbook of Food Engineering*. Food science and technology. Taylor & Francis, Hoboken, 2nd ed. edition, 2007. ISBN 978-0-8247-5331-3. URL <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=283237>.
- [80] George Saravacos and Athanasios E. Kostaropoulos. *Handbook of Food Processing Equipment*. Springer International Publishing, Cham, 2016. ISBN 978-3-319-25018-2. doi: 10.1007/978-3-319-25020-5.
- [81] Caroline Weidemann, Nicole Barkholz, and Hermann Nirschl. Removal mechanisms of particulate contaminations from polymer woven filter media. *Separation and Purification Technology*, 136:168–176, 2014. ISSN 13835866. doi: 10.1016/j.seppur.2014.09.001.
- [82] Sebastian Stahl. *Zum Reinigungsverhalten von Filtergeweben auf diskontinuierlichen Filterzentrifugen*. Dissertation, Karlsruhe, 2013.
- [83] Stephen Tarleton and Richard Wakeman. *Solid/ Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration*. Elsevier Science, Burlington, 2005. ISBN 978-1-8561-7419-0. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=755797>.
- [84] EHEDG. Guidelines, 2018-03-14. URL <https://www.ehedg.org/guidelines/>.
- [85] ISO. Sicherheit von maschinen - hygieneanforderungen an die gestaltung von maschinen (iso 14159:2002); deutsche fassung en iso 14159:2008, 2008-07.
- [86] VDMA Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate. Riboflavin-test für keimarme oder sterile verfahrenstechniken, 2007-12. URL <https://www.vdma.org/documents/106036/1384864/Download1/8f078e13-ea15-49bc-ab52-68fd828ed7d4>.
- [87] P. J. Fryer and K. Asteriadou. A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning processes. *Trends in Food Science & Technology*, 20 (6-7):255–262, 2009. ISSN 09242244. doi: 10.1016/j.tifs.2009.03.005.
- [88] D. I. Wilson. Challenges in cleaning: Recent developments and future prospects. *Heat Transfer Engineering*, 26(1):51–59, 2005. ISSN 0145-7632. doi: 10.1080/01457630590890175.

- [89] Marc Mauermann, Jens-Peter Majschak, Thomas Bley, Cornelia Bellmann, Alfredo Calvimontes, and Anja Caspari. Reinigbarkeit von oberflächen in der lebensmittelindustrie durch flüssigkeitsstrahlen. *Chemie Ingenieur Technik*, 84(9):1568–1574, 2012. doi: 10.1002/cite.201100232.
- [90] Matthias Joppa, Hannes Köhler, Frank Rüdiger, Jens-Peter Majschak, and Jochen Fröhlich. Experiments and simulations on the cleaning of a swellable soil in plane channel flow. *Heat Transfer Engineering*, 38(7-8):786–795, 2016. ISSN 0145-7632. doi: 10.1080/01457632.2016.1206420.
- [91] SharkD. Wikimedia commons, 2018-03-24. URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:SharkD>.
- [92] Sternberg. Biomedical image processing. *Computer*, 16(1):22–34, 1983. ISSN 0018-9162. doi: 10.1109/MC.1983.1654163.
- [93] imagej.net. Auto threshold, 2017. URL [https://imagej.net/Auto\\_Threshold](https://imagej.net/Auto_Threshold).
- [94] Antti Niemistö. A comparison of nonparametric histogram-based thresholding algorithms, 2004. URL <https://github.com/carandraug/histthresh/blob/master/doc/ThreshComp.pdf>.
- [95] T. W. Ridler and S. Calvard. Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8(8):630–632, 1978. ISSN 0018-9472. doi: 10.1109/TSMC.1978.4310039.
- [96] L. Vincent and P. Soille. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6):583–598, 1991. ISSN 01628828. doi: 10.1109/34.87344.
- [97] A. Kumar. Computer-vision-based fabric defect detection: A survey. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 55(1):348–363, 2008. ISSN 0278-0046. doi: 10.1109/TIE.1930.896476.
- [98] Henry Y.T. Ngan, Grantham K.H. Pang, and Nelson H.C. Yung. Automated fabric defect detection—a review. *Image and Vision Computing*, 29(7):442–458, 2011. ISSN 02628856. doi: 10.1016/j.imavis.2011.02.002.

- [99] Yixiang Frank Zhang and Randall R. Bresee. Fabric defect detection and classification using image analysis. *Textile Research Journal*, 65(1):1–9, 1995. ISSN 0040-5175. doi: 10.1177/004051759506500101.
- [100] Yanxi Liu, Robert T. Collins, and Yanghai Tsin. A computational model for periodic pattern perception based on frieze and wallpaper groups. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 26(3):354–371, 2004. ISSN 0162-8828. doi: 10.1109/TPAMI.2004.1262332.
- [101] Hsin-Chih Lin, Ling-Ling Wang, and Shi-Nine Yang. Extracting periodicity of a regular texture based on autocorrelation functions. *Pattern Recognition Letters*, 18(5):433–443, 1997. ISSN 01678655. doi: 10.1016/S0167-8655(97)00030-5.
- [102] Yanxi Liu, Yanghai Tsin, and Wen-Chieh Lin. The promise and perils of near-regular texture. *International Journal of Computer Vision*, 62(1-2): 145–159, 2005. ISSN 0920-5691. doi: 10.1007/s11263-005-4639-0.
- [103] Gyuhwan Oh, Seungyong Lee, and Sung Yong Shin. Fast determination of textural periodicity using distance matching function. *Pattern Recognition Letters*, 20(2):191–197, 1999. ISSN 01678655. doi: 10.1016/S0167-8655(98)00140-8.
- [104] Takashi Matsuyama, Shu-Ichi Miura, and Makoto Nagao. Structural analysis of natural textures by fourier transformation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24(3):347–362, 1983. doi: 10.1016/0734-189X(83)90060-9.
- [105] J. Parkkinen, K. Selkänaho, and E. Oja. Detecting texture periodicity from the cooccurrence matrix. *Pattern Recognition Letters*, 11(1):43–50, 1990. ISSN 01678655. doi: 10.1016/0167-8655(90)90054-6.
- [106] D. Chetverikov and A. Hanbury. Finding defects in texture using regularity and local orientation. *Pattern Recognition*, 35(10):2165–2180, 2002. ISSN 00313203. doi: 10.1016/S0031-3203(01)00188-1.
- [107] V. Asha, P. Nagabhushan, and N. U. Bhajantri. Automatic extraction of texture-periodicity using superposition of distance matching functions and their forward differences. *Pattern Recognition Letters*, 33(5):629–640, 2012. ISSN 01678655. doi: 10.1016/j.patrec.2011.11.027.

- [108] Ilja N. Bronštejn, Heiner Mühlig, Gerhard Musiol, and Konstantin A. Semendjajev. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Haan, Rhein, 10. überarbeitete auflage edition, 2016. ISBN 978-3-8085-5789-1. URL [http://www.europa-lehrmittel.de/t-1/taschenbuch\\_der\\_mathematik\\_bronstein-2657/presseinformation/9783808557891.pdf](http://www.europa-lehrmittel.de/t-1/taschenbuch_der_mathematik_bronstein-2657/presseinformation/9783808557891.pdf).
- [109] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc van Gool. Surf: Speeded up robust features. *LNCS 3951*, pages 404–417, 2006.
- [110] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION*, pages I-511–I-518, 2001. doi: 10.1109/CVPR.2001.990517.
- [111] Franklin C. Crow. *Summed-area tables for texture mapping*. ACM, New York, NY, 1984. ISBN 0897911385. doi: 10.1145/800031.808600. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=800031>.
- [112] Alfred Haar. Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Mathematische Annalen*, 69(3):331–371, 1910. ISSN 0025-5831. doi: 10.1007/BF01456326.
- [113] F. Podczec, J. M. Newton, and M. B. James. The adhesion force of micronized salmeterol xinafoate particles to pharmaceutically relevant surface materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29(7):1878–1884, 1996. ISSN 0022-3727. doi: 10.1088/0022-3727/29/7/023.
- [114] G. R. Salazar-Banda, R. D. Lucas, J. R. Coury, and M. L. Aguiar. The influence of particulate matter and filtration conditions on the cleaning of fabric filters. *Separation Science and Technology*, 48(2):223–233, 2012. ISSN 0149-6395. doi: 10.1080/01496395.2012.682617.
- [115] Caroline Weidemann. *Reinigungsfähigkeit von Filtermedien mithilfe kontinuierlicher und pulsierender Strömung: Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2014*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe and Hannover, 2015. ISBN 9783731503224. doi: 10.5445/KSP/1000044959. URL <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn15/819614203.pdf>.

- [116] Johannes Knoll. *Haftmechanismen von funktionalisierten magnetischen Kompositpartikeln in der Hochgradienten-Magnetseparation*. Dissertation, KIT, Karlsruhe, 2017.
- [117] G. A. Turner and m. Balasubramanian. Investigations of the contributions to the tensile strength of weak particulate masses. *Powder Technology*, 10: 121–127, 1974. ISSN 00325910.
- [118] Siming You and Man Pun Wan. Modeling and experiments of the adhesion force distribution between particles and a surface. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 30(23):6808–6818, 2014. ISSN 1520-5827. doi: 10.1021/la500360f.
- [119] M. A. Felicetti, J. R. Coury, and M. L. Aguiar. Centrifuge study on influence of particle size, compression and substratum on particle-surface adhesion force. *Materials Science Forum*, 591-593:347–351, 2008. ISSN 1662-9752. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.591-593.347.
- [120] M. A. Felicetti, F. Piantino, J. R. Coury, and M. L. Aguiar. Influence of removal time and particle size on the particle substrate adhesion force. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(1):71–82, 2008. ISSN 0104-6632. doi: 10.1590/S0104-66322008000100009.
- [121] Marcos A. Felicetti, Giancarlo R. Salazar-Banda, José R. Coury, and Mônica L. Aguiar. Influence of particle size, applied compression, and substratum material on particle–surface adhesion force using the centrifuge technique. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(2):877–887, 2009. ISSN 0888-5885. doi: 10.1021/ie071506u.
- [122] P.G.C. Petean and M. L. Aguiar. Determining the adhesion force between particles and rough surfaces. *Powder Technology*, 274:67–76, 2015. ISSN 00325910. doi: 10.1016/j.powtec.2014.12.047.
- [123] N. Dalal and B. Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. pages 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
- [124] Richard W. Connors and Charles A. Harlow. Toward a structural textural analyzer based on statistical methods. *Computer Graphics and Image Processing*, 12(3):224–256, 1980. doi: 10.1016/0146-664X(80)90013-1.

- [125] Junfeng Jing, Mengmeng Xu, and Pengfei Li. Automatic recognition of weave pattern and repeat for yarn-dyed fabric based on kfc and idmf. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 126(21):2876–2883, 2015. ISSN 00304026. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.07.025.
- [126] J. P. Lewis. Fast template matching, 1995-05-15 - 19.
- [127] Henry Y.T. Ngan, Grantham K.H. Pang, S. P. Yung, and Michael K. Ng. Wavelet based methods on patterned fabric defect detection. *Pattern Recognition*, 38(4):559–576, 2005. ISSN 00313203. doi: 10.1016/j.patcog.2004.07.009.
- [128] Gerhard Hauser. *Hygienegerechte Apparate und Anlagen: Für die Lebensmittel-, Pharma- und Kosmetikindustrie*. Wiley-VCH, Weinheim, 2015. ISBN 978-3-527-32291-6. URL <http://dx.doi.org/10.1002/9783527661732>.
- [129] C. Létang, M. Piau, and C. Verdier. Characterization of wheat flour–water doughs. part i: Rheometry and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 41(2):121–132, 1999. ISSN 02608774. doi: 10.1016/S0260-8774(99)00082-5.
- [130] S. Derler, G-M Rotaru, W. Ke, L. El Issawi-Frischknecht, P. Kellenberger, A. Scheel-Sailer, and R. M. Rossi. Microscopic contact area and friction between medical textiles and skin. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 38:114–125, 2014. ISSN 1878-0180. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.06.014.
- [131] Vidushi Bajpai, Apurba Dey, Subrata Ghosh, S. Bajpai, and M. K. Jha. Quantification of bacterial adherence on different textile fabrics. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(8):1169–1174, 2011. ISSN 09648305. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.04.012.
- [132] K. H. Wallhäuser. Die antimikrobielle ausrüstung von textilien. *Textilveredlung*, 5:3–14, 1970.
- [133] Wolfgang Bobeth and Werner Berger, editors. *Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften*. Springer, Berlin, 1993. ISBN 3-540-55697-4.

- 
- [134] Jadwiga Szostak-Kotowa. Biodeterioration of textiles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 53(3):165–170, 2004. ISSN 09648305. doi: 10.1016/S0964-8305(03)00090-8.
- [135] Garth A. Carnaby. The mechanics of carpet wear. *Textile Research Journal*, 51(8):514–519, 2016. ISSN 0040-5175. doi: 10.1177/004051758105100804.
- [136] Ivana Kos, Ivana Gudlin Schwarz, and Katarina Suton. Influence of warp density on physical-mechanical properties of coated fabric. *Procedia Engineering*, 69:881–889, 2014. ISSN 18777058. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.066.
- [137] Marie-Ange Bueno, Bernard Lamy, and Marc Renner. Effect of grain size and abrasion duration on the state of textile fabric surfaces. *Wear*, 253(3-4): 448–457, 2002. ISSN 00431648. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00146-1.



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Weizenmehlpartikel und PGV-Kurve . . . . .	8
2.2	CLSM-Aufnahmen von Gärtuchoberflächen . . . . .	12
2.3	Schematischer Aufbau gewebter Textilien . . . . .	13
2.4	Schema zur Kapillarkraft . . . . .	20
2.5	Farbräume . . . . .	32
3.1	Partikelgrößenverteilung der verwendeten Mehlfraktionen. . . . .	39
3.2	Geschmirgeltes Edelstahlblech . . . . .	41
3.3	Schema zu den Oberflächenparametern aus ISO 25178-2 . . . . .	45
3.4	Küvetten und Adapter . . . . .	47
3.5	Versuchsvorbereitung Teig . . . . .	49
3.6	Funktionsschema LumiFuge . . . . .	50
3.7	Bürstapparat . . . . .	52
3.8	Bildauswertung aufgefangener Mehlpartikel . . . . .	54
3.9	Schema: Algorithmus zur Schmutzerkennung . . . . .	56
4.1	Durch Schmirgeln hervorgerufene Rauheit . . . . .	61
4.2	Verschiedene Wirkung des Schmirgels . . . . .	62
4.3	Rauheitsparameter am elektropolierten Blech . . . . .	63
4.4	Abreinigung verschiedener Mehlpartikelgrößen . . . . .	64
4.5	Ablösung von Mehlpartikeln von unterschiedlich geschmirgelten Oberflächen . . . . .	65
4.6	Abreinigung von Mehl von Gärtüchern . . . . .	67
4.7	Haftspannung in Abhängigkeit des Teigalters . . . . .	69
4.8	Teighaftung auf Förderbändern . . . . .	70
4.9	Förderbänder . . . . .	70
4.10	Teighaftung an verschiedenen Gärtüchern . . . . .	72
4.11	Teighaftung an Gärtüchern in Abhängigkeit des Spitzenanteils . . . . .	73
4.12	Gealterte Gärtücher . . . . .	74
4.13	Maximale Spitzenhöhe unter praktischem Gebrauch . . . . .	75
4.14	Zunahme der maximalen Spitzen durch Bürsten . . . . .	76
4.15	Extreme Spitzenhöhe und Taltiefe bei gewaschenen Gärtüchern . . . . .	77
4.16	Teighaftung auf gebrauchten Tüchern . . . . .	78
4.17	Teighaftung auf gebürsteten Tüchern . . . . .	79

---

4.18	Schema: Wirkung der Haarigkeit auf die scheinbare Haftspannung	80
4.19	Teighaftung auf gewaschenen Tüchern . . . . .	80
5.1	Beispielbilder zur Schmutzauswertung . . . . .	85
5.2	Beispielbilder zur Schmutzauswertung (fortgesetzt) . . . . .	86
5.3	Vorwärtsdifferenz und zweite Vorwärtsdifferenz . . . . .	87
5.4	Zweite Vorwärtsdifferenz von sauberem und schmutzigem Bild . .	88
5.5	Phasenversatz in der Periodizitätserkennung . . . . .	88
5.6	Subtraktion des Bildhintergrunds . . . . .	89
5.7	Detail: kontrastarmer Schmutz . . . . .	90
5.8	Detail: kontrastreicher Schmutz . . . . .	90
5.9	Haar-Faltung eines schmutzigen Bildes . . . . .	91
5.10	Reinigungsfortschritt im Schmutzindex DI . . . . .	91
5.11	Skalierung der Rechenzeit . . . . .	94
6.1	Teighaftung an gealterten Gärtüchern nach deren Spitzenanteil . .	97

# Tabellenverzeichnis

3.1	Verwendete Förderbandmaterialien . . . . .	42
3.2	Verwendete Baumwolltücher . . . . .	42
3.3	Weitere verwendete Gärtücher . . . . .	43
3.4	Alterungsmethoden der Gärtücher . . . . .	53
4.1	Wiederholbarkeit Oberflächenauswertung . . . . .	63
5.1	Zeitbedarf in der Bildauswertung . . . . .	93