



Institut für  
Chemische und Thermische  
Verfahrenstechnik

**ICTV**

Nathalie Gottschalk

# Stofftransport bei der CIP-Reinigung von Lebensmittelablagerungen

**ICTV – Schriftenreihe Band 43**

Hrsg. Stephan Scholl und Wolfgang Augustin



Technische  
Universität  
Braunschweig

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2022

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2022

### **Herausgeber:**

Stephan Scholl, Wolfgang Augustin

ICTV – Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik

Langer Kamp 7

38106 Braunschweig

Telefon + 49 (0)531 391 2781

Telefax + 49 (0)531 391 2792

[ictv@tu-braunschweig.de](mailto:ictv@tu-braunschweig.de)

[www.ictv.tu-bs.de](http://www.ictv.tu-bs.de)

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2022

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2022

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISSN 1860-1316

ISBN 978-3-7369-7659-7

eISBN 978-3-7369-6659-8



# Stofftransport bei der CIP-Reinigung von Lebensmittelablagerungen

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Nathalie Gottschalk, geb. Rehbein  
aus (Geburtsort): Hamburg

eingereicht am: 16.12.2021  
mündliche Prüfung am: 25.03.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. S. Scholl  
Prof. Dr. habil. R. Krull

2022





# Vorwort

Diese Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Braunschweig angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl für die Bereitstellung des Themas, die Unterstützung meiner Forschung und das langjährige Vertrauen in meine Fähigkeiten insbesondere auch während meiner Teilzeittätigkeit. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. habil. Rainer Krull für die Übernahme des Koreferats und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Bei Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Augustin möchte ich mich herzlich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die konstruktive Diskussion meiner Forschung und viele nette gemeinsame Dienstreisen bedanken.

Meinen Kollegen am ICTV danke ich für die gute Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich Marcus Watts, Florian Schlüter, Hannes Deponte, Janina Heinze und Hanna Wiese für die anregenden Diskussionen sowie die gute Zusammenarbeit. Den Mitarbeitern im Labor, im besonderen Anke Schmidt-Radeleff, danke ich für die tatkräftige Unterstützung. Der mechanischen und elektronischen Werkstatt, vor allem Karl Karrenführer und Jörg Leppelt, danke ich für die kreativen Ideen und die unermüdliche Unterstützung beim Anlagenaufbau. Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen im Sekretariat und insbesondere Marion Harms für die fachkundige Unterstützung bei den Verwaltungsaufgaben. Herzlich danken möchte ich auch den vielen Studierenden, die mich bei der Laborarbeit unterstützt haben.

Für die Ausleihe eines digitalen Handrefraktometers danke ich dem Institut für Partikeltechnik und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Ingo Kampen und Herrn Marcel Schradler. Zudem danke ich der Firma Ovobest Eiprodukte GmbH & Co. KG für die Bereitstellung des Eigelbpulvers für die experimentellen Versuche.

Mein besonderer Dank gilt auch meiner Familie. Ich danke meinen Eltern für die außerordentliche Unterstützung auf meinem Bildungsweg. Meiner Mutter, die die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr miterleben konnte, danke ich insbesondere dafür, dass sie mir immer wieder Mut gemacht und an mich geglaubt hat. Meinem Vater danke ich für die umfassenden Diskussionen und das Gegenlesen meiner Arbeit. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Felix für die vielen hilfreichen Diskussionen, die Unterstützung und Motivation bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Braunschweig, 2022

N. Gottschalk





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>4</b>
2.1 Cleaning-in-Place .....	4
2.1.1 Grundlagen der CIP-Reinigung in geschlossenen Systemen .....	5
2.1.2 Reinigungskinetik beim Cleaning-in-Place .....	6
2.1.3 Stofftransportmechanismen beim Cleaning-in-Place .....	9
2.2 Strömende Fluide und Partikelbewegung .....	12
2.2.1 Grundlagen der Fluidodynamik .....	13
2.2.2 Partikelabtrag und -transport in Wandnähe .....	16
2.3 Diffusion.....	18
2.3.1 Partikeldiffusion durch Flüssigkeiten .....	19
2.3.2 Diffusion von Flüssigkeiten in Feststoffen .....	20
2.4 Partikelgrößenmessung mittels Laserbeugung.....	20
2.5 Modellverschmutzungen für Reinigungsuntersuchungen.....	23
2.5.1 Eigelb .....	26
2.5.2 Stärke .....	28
<b>3 Konzeptentwicklung</b> .....	<b>32</b>
3.1 Wissenslücke.....	32
3.2 Modellvorstellung des Stofftransports bei der Abreinigung.....	33
3.3 Abgeleitete Untersuchungen .....	34
3.4 Wahl der Modellverschmutzungen .....	36
<b>4 Experimentelle Untersuchungen</b> .....	<b>38</b>



4.1	Reinigungsanlage .....	38
4.2	Modellverschmutzungen und Probenherstellung.....	42
4.2.1	Eigelverschmutzung .....	42
4.2.2	Stärkeverschmutzung.....	44
4.3	Bestimmung der Partikeleigenschaften.....	44
4.3.1	Partikelgrößenmessung.....	44
4.3.2	Dichte der Partikel .....	45
4.3.3	Realer Brechungsindex .....	45
4.3.4	Absorptionskoeffizient .....	46
4.3.5	Mikroskopie.....	47
4.4	Schichtdickenmessung mittels Fluid Dynamic Gauging .....	47
4.4.1	Bestimmung der Ausgangsschichtdicke .....	49
4.4.2	Quellverhalten der Verschmutzungsschicht .....	50
4.5	Bestimmung der Verschmutzungskonzentration im Reinigungsmittel ...	52
4.6	Messung der Partikeldiffusion .....	55
4.7	Statistische Versuchsauswertung und Modellbildung .....	57
<b>5</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse .....</b>	<b>64</b>
5.1	Ausgangsschichtdicke der Verschmutzungsschicht .....	64
5.2	Eigenschaften der Verschmutzungspartikel.....	65
5.2.1	Partikeldichte .....	65
5.2.2	Realer Brechungsindex der Partikel .....	66
5.2.3	Absorptionskoeffizient der Partikel.....	69
5.2.4	Partikelgröße.....	71
5.3	Größe der abgetragenen Verschmutzungspartikel .....	76
5.3.1	Veränderung der Partikelgröße über die Reinigungszeit.....	76
5.3.2	Einfluss der Reinigungsparameter auf die Partikelgröße .....	80
5.3.3	Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus der Partikelgröße.....	85
5.4	Quellverhalten der Verschmutzungsschicht .....	87
5.4.1	Modellierung des Quellverhaltens.....	88
5.4.2	Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzungsschicht .....	97
5.5	Diffusionskoeffizienten der Verschmutzungspartikel .....	103
5.5.1	Einfluss der Diffusionszeit .....	103
5.5.2	Einfluss der Konzentration an Natronlauge.....	107
5.6	Kinetik der Reinigung .....	109
5.6.1	Weibull-Modell der Reinigungskurven .....	109
5.6.2	Einflussfaktoren auf die Reinigungszeit.....	112



<b>6</b>	<b>Simulation des Partikeltransports durch die viskose Unterschicht.....</b>	<b>121</b>
6.1	Grundlagen zur Berechnung des Partikeltransports.....	121
6.1.1	Annahmen und Kräftegleichgewicht am Partikel.....	121
6.1.2	Konvektiver Partikeltransport senkrecht zur Wand.....	124
6.1.3	Diffusiver Partikeltransport .....	126
6.1.4	Konvektiver Partikeltransport in Strömungsrichtung.....	127
6.1.5	Numerisches Lösen des Differentialgleichungssystems.....	128
6.2	Einflüsse auf den Partikeltransport bei der Reinigung.....	129
6.2.1	Einfluss der einzelnen Reinigungsparameter.....	131
6.2.2	Einfluss der Eigenschaften der Verschmutzungspartikel .....	136
6.3	Diffusiver und konvektiver Partikeltransport.....	139
6.4	Partikeltransport bei der Reinigung von Eigelb.....	142
<b>7</b>	<b>Übertragung auf die Reinigung von Stärke .....</b>	<b>147</b>
7.1	Benötigte Reinigungszeit für die Stärkeverschmutzung .....	147
7.2	Partikelgröße der abgereinigten Stärkepartikel.....	150
7.3	Partikeltransport bei der Reinigung von Stärke .....	152
7.4	Vergleich der Reinigung von Stärke und Eigelb.....	155
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>161</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>171</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>179</b>
	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>180</b>

# Kurzfassung

Die Reinigung von Anlagen in der Lebensmittelindustrie wird meist durch ein Cleaning-in-Place realisiert. Dabei sind drei Stofftransportmechanismen relevant: die Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzung, das Ablösen der Verschmutzungspartikel und der Transport dieser in die Kernströmung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Stofftransportprozesse experimentell und theoretisch für partikulär abreinigende Modellverschmutzungen untersucht und es wird diskutiert, unter welchen Bedingungen welcher Transportprozess geschwindigkeitslimitierend für die gesamte Reinigung sein kann. Insbesondere wurde dabei der Frage nachgegangen, in welchem Umfang der Transport der Verschmutzungspartikel in Richtung Kernströmung eher diffusiv oder konvektiv erfolgt.

Die experimentellen Untersuchungen des Stofftransports bei der Reinigung erfolgten an einer Modellverschmutzung aus Eigelb. Neben der Ermittlung der Reinigungskinetik durch Konzentrationsbestimmungen im Reinigungsmittel, wurden online Partikelgrößenmessungen zur Bestimmung der Größe der abgereinigten Verschmutzungspartikel während der Reinigung durchgeführt. Da hierzu die Mie-Theorie verwendet wurde, musste der komplexe Brechungsindex der Eigelbpartikel experimentell ermittelt werden. Zur Berechnung der Diffusionsgeschwindigkeit des Reinigungsmittels in die Eigelbschicht wurde die Schichtdickenänderung mittels Fluid Dynamic Gauging untersucht und unter Annahme von Fickscher Diffusion modelliert. Die Partikeldiffusion aus der Verschmutzungsschicht wurde aus den in einer Diffusionsmesszelle gemessenen Konzentrationsunterschieden in unterschiedlichen Abständen zur Schicht ermittelt.

Durch Entwicklung eines Modells des Partikeltransports beruhend auf dem Kräftegleichgewicht am Einzelpartikel konnte gezeigt werden, dass auch Verschmutzungspartikel, deren Durchmesser lediglich 10 % der Dicke der viskosen Unterschicht aufweisen, in der Regel vorwiegend konvektiv transportiert werden. Der dynamische Auftrieb aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten der Strömung unter- und oberhalb des Partikels führt zu einem, im Verhältnis zur Diffusionsgeschwindigkeit, schnellen Transport in Richtung Kernströmung. Eine Geschwindigkeitslimitierung durch den Abtransport der Partikel in die Kernströmung ist daher ab Partikelgrößen von 1  $\mu\text{m}$  unwahrscheinlich. Der experimentell ermittelte Diffusionskoeffizient der Partikel konnte mit der Stokes-Einstein-Gleichung abgeschätzt werden.

Die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Verschmutzungen wurde anhand der Abreinigung einer Stärkeverschmutzung untersucht. Dabei zeigte sich, dass die bei der Reinigung mit Wasser abgelösten Stärkepartikel wesentlich größer als die Eigelbpartikel sind und daher schneller konvektiv durch die viskose Unterschicht transportiert werden. Nichtsdestotrotz ist die Reinigungsgeschwindigkeit der Stärke langsamer als bei Eigelb.



# Abstract

Cleaning of process plants in the food industry is usually realized by cleaning-in-place. The three relevant mass transport mechanisms for this are: diffusion of the cleaning agent into the soil layer, detachment of the soil particles and their transport into the turbulent core flow. In this dissertation, mass transport processes were investigated experimentally and theoretically for particulate detaching model food soils. Furthermore, the conditions for cleaning speed limitations due to these different mass transport mechanisms are discussed. Special focus was placed on the question whether the particle transport through the viscous sublayer is driven by diffusion or convection.

For the experimental investigation of the mass transport mechanisms during cleaning an egg yolk soil was used as model system. In addition to the determination of cleaning kinetics measured by the change of concentration in the cleaning agent, the size of detached soil particles was characterized through online particle size measurements during the cleaning process. Mie theory was utilized for this purpose, necessitating the experimental determination of the complex refractive index of egg yolk particles. To calculate the diffusion coefficient of the cleaning agent into the soil layer, the change in layer thickness was investigated using the Fluid Dynamic Gauging technique and modelled under the assumption of Fickian diffusion. Particle diffusion from the soil layer into the cleaning agent was calculated from concentration differences depending on the distance to the soil layer measured in a newly developed diffusion cell.

A model describing particle transport based on the force balance was developed and it was shown that soil particles with diameters of only 10 % of the viscous sublayer thickness are predominantly transported by convection. The dynamic lift force caused by the velocity gradient in the viscous sublayer flow leads to a fast particle transport compared to diffusion velocity. A speed limitation by particle transport for particles with diameters of 1  $\mu\text{m}$  and bigger is therefore unlikely. The experimentally determined diffusion coefficient of the particles could be reasonably estimated using the Stokes-Einstein equation.

The transferability of the gained knowledge to other soils was investigated by cleaning experiments of a starch soil layer. It was shown that starch particles detached with water are larger than egg yolk particles and therefore transported faster by convection through the viscous sublayer. Nevertheless, the cleaning speed of the starch soil is slower than for the egg yolk soil.



# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## Lateinische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	$\text{m s}^{-2}$	Beschleunigung
$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$B_1, B_2, B_3, B_4$		Boltzmann-Parameter
$c$	$\text{mol L}^{-1}, \text{g L}^{-1}$	Konzentration
$c_w$		Strömungswiderstandskoeffizient
$d$	$\text{m}$	Durchmesser
$D$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Diffusionskoeffizient
erf		Gaußsche Fehlerfunktion (engl.: error function)
$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$	Aktivierungsenergie
$E_\lambda$		Extinktion
$F_{A,d}$	$\text{N}$	dynamische Auftriebskraft
$F_{A,h}$	$\text{N}$	hydrostatische Auftriebskraft
$F_G$	$\text{N}$	Gewichtskraft
$F_T$	$\text{N}$	Trägheitskraft
$F_W$	$\text{N}$	Widerstandskraft
$g$	$\text{m s}^{-2}$	Erdbeschleunigung: $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
$h$	$\text{mm}$	Abstand zwischen FDG-Düse und Probe
$H$	$\text{mm}$	hydrostatische Höhe
$k$	$\text{J K}^{-1}$	Boltzmann-Konstante: $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
$k_R$		Geschwindigkeitskonstante der Reinigung
$K$		Konstante
$m$	$\text{kg}$	Masse
$\dot{m}$	$\text{kg s}^{-1}$	Massenstrom
$m_s$	$\text{kg m}^{-2}$	Schmutzmenge pro Flächeneinheit
$n$		Anzahl
$\dot{n}$	$\text{mol h}^{-1}$	Stoffstrom
$n_k$		komplexer Brechungsindex
$n_r$		realer Brechungsindex
$p$		$p$ -Wert, Wahrscheinlichkeit beim Signifikanztest
PRESS		vorhergesagte Residuenquadratsumme (engl.: Predicted Residual Sum of Squares)
$q_0$		anzahlbezogene Dichteverteilung
$q_3$		massenbezogene Dichteverteilung
$Q^2$		angepasstes Bestimmtheitsmaß
$r$		Radius
$r_R$		Reinigungsrate
$R$		Reproduzierbarkeit
$R^2$		empirisches Bestimmtheitsmaß
$R_R$		Steilheit der Reinigung
Re		Reynoldszahl
$s$	$\text{m}$	Strecke, Weg, Schichtdicke
$s_R$		Reinigungsgrad



<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
SS		Quadratsumme (engl.: Sum of Squares)
stabw		Standardabweichung
$t$	s oder min	Zeit
$t_{95}$	min	Reinigungszeit zur Entfernung von 95 % der Verschmutzung
$t_m$	s	Messzeit
$T$	K	Temperatur
$T_R$	min	Zeitkonstante der Reinigung
$U$		Umfang
$V$	L	Volumen
$w$	$\text{m s}^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit
$w_R$	m	Breite der Spitze der FDG-Düse
$w_\tau$	$\text{m s}^{-1}$	Schubspannungsgeschwindigkeit
$x_{10}$	m	10 % Quantil
$x_{50}$	m	Median, 50 % Quantil
$x_{90}$	m	90 % Quantil
$x_{\text{peak}}$	m	Modalwert der Partikelgrößenverteilung (Peak)
$X$		Matrix der Werte der Einflussfaktoren
$y$	m	Wandabstand
$\hat{y}$		Messantwort
$\hat{Y}$		Antwort des Modells
$Y$		Matrix der gemessenen Antworten
$\hat{Y}$		Matrix der Modellantworten

### Griechische Symbole und Sonderzeichen

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$		relativer Abstand bei statistischen Versuchsplänen
$\beta$		Regressionskoeffizient
$\delta$	m	Dicke, Grenzschicht
$\Delta$		Differenz
$\varepsilon_\lambda$	L $\text{mg}^{-1}$ $\text{cm}^{-1}$	spektraler Absorptionskoeffizient
$\eta$	Pa s	dynamische Viskosität
$\theta$	°	Winkel der FDG Düse
$\vartheta$	° C	Temperatur
$\kappa$		Konstante
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\lambda_R$		Rohrreibungszahl
$\mu$		Erwartungswert der Nullhypothese
$\nu$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	kinematische Viskosität
$\xi$	$\text{g g}^{-1}$	Massenanteil
$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$	Dichte
$\mathcal{R}$	$\text{J mol}^{-1}$	universelle Gaskonstante: $\mathcal{R} = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$\sigma$		Varianz
$\tau$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Schubspannung
$\mathcal{V}$		Validität
$x$		Einflussfaktor



**Indizes**

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
0	zum Zeitpunkt Null
$\infty$	Unendlich
*	normiert, dimensionslos
~	transformiert
—	arithmetischer Mittelwert
<i>c</i>	Konzentration
cv	Kreuzvalidierung (engl.: cross validation)
<i>d</i>	diffusiv
<i>D</i>	Diffusion
Disp	Dispersion
Düse	FDG-Düse
<i>f</i>	Fluid
FDG	Fluid Dynamic Gauging
fr	frisch
<i>h</i>	hydraulisch
<i>i</i>	Zählindex
<i>j</i>	Zählindex
<i>k</i>	konvektiv
krit	kritisch
Laser	Laser
LoF	Lack-of-Fit
<i>m</i>	arithmetisch gemittelt
max	maximal
<i>n</i>	Zählindex
NaOH	Natriumhydroxid
opt	optisch
<i>p</i>	Partikel
pe	reiner Fehler (engl.: pure error)
PLS	Partielle kleinste Quadrate Regression
quer	Querschnitt
<i>R</i>	Rohr
ref	Referenz
rel	relativ
res	Residuen
RM	Reinigungsmittel
<i>s</i>	Quellung (engl.: swelling), Verschmutzung (engl.: soil)
tot	total
<i>v</i>	viskose Unterschicht
<i>w</i>	Wand
<i>x</i>	Strömungsrichtung
<i>y</i>	senkrecht zur Wand



## Abkürzungen

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
APAC	Automated Particle Analyzer for Cleaning
ber.	berechnet
CIP	Cleaning-in-Place
FDG	Fluid Dynamic Gauging
FREE	erweiterte Fraunhofer-Theorie
getr.	getrocknet
HDL	high density lipoprotein
KOH	Kaliumhydroxid
Konz.	Konzentration
LDL	low density lipoprotein
NaOH	Natriumhydroxid
norm.	normiert
PLS	Partielle kleinste Quadrate Regression (engl.: Partial Least Squares Regression)
quadr.	quadratisch
SMUF	Milchsalze (engl.: simulated milk ultrafiltrate)
UV	Ultraviolettstrahlung
VIS	sichtbare Strahlung (engl.: visible)
WPC	Molkenproteinkonzentrat (engl.: whey protein concentrate)
WPI	Molkenproteinisolat (engl.: whey protein isolate)





# 1 Einleitung

Reinigungsprozesse sind insbesondere in der Lebensmittel- und pharmazeutischen aber auch der chemischen Industrie von großer Relevanz zur Aufrechterhaltung der meisten Produktionsprozesse sowie zur Sicherstellung der erwünschten Produktqualität. Bei der Verarbeitung von Lebensmitteln und pharmazeutischen Produkten spielen dabei vor allem die hohen Hygieneanforderungen eine Rolle. Eine unzureichende Reinigung der Produktionsanlagen kann unter anderem zur Vermehrung von Mikroorganismen auf produktberührenden Oberflächen und somit zur Kontamination der verarbeiteten Lebensmittel führen. Dies birgt die Gefahr gesundheitlicher Schäden beim Verzehr dieser Lebensmittel und kann schlimmsten Falls sogar zum Tod des Konsumenten führen. Um dies sowie den resultierenden Imageschaden und hohe Kosten durch Rückrufaktionen, zu verhindern, werden die produktberührenden Anlagenbereich besonders sorgfältig gereinigt. Generell wird daher meist lieber zu lange, zu heiß und mit zu viel Reinigungsmittel gereinigt als zur Entfernung der Verschmutzung notwendig wäre [Fryer und Asteriadou, 2009].

Die Überdimensionierung der Reinigungsprozesse führt zu hohen Kosten und einem großen Einsparpotential von Wasser, thermischer und mechanischer Energie sowie Reinigungsmitteln. Neben der Kostenersparnis und der Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Reinigungsprozesse spielt zunehmend auch die Reduzierung des Wasserverbrauchs eine wichtige Rolle. Laut WHO [2019] und WWF [2020] wird vermutlich bereits zwischen 2025 und 2050 der Anteil der Weltbevölkerung, die zumindest zeitweise von Wasserknappheit betroffen sind, von derzeit ca. 17 % auf über 50 % ansteigen. Auch in den letzten Jahren sind große Städte, wie Peking, Istanbul, Rio de Janeiro und Kapstadt, schon von akuter Wasserknappheit betroffen gewesen [WWF, 2020]. Der ressourcenschonende Umgang mit Trinkwasser und die Reduzierung durch Reinigungsmittel belasteter Abwässer wandelt sich durch deutlich ansteigende Kosten vom ökologisch zum ebenfalls ökonomisch relevanten Thema.

In der Lebensmittelindustrie wird häufig ein Cleaning-in-Place (CIP) durchgeführt, bei dem die Anlage nicht demontiert werden muss, sondern die Reinigung der Rohrleitungen und Einbauten durch die Durchströmung mit dem Reinigungsmittel bei erhöhter Temperatur erreicht wird. Die Reinigung wird dabei anhand eines festgelegten Reinigungsprotokolls durchgeführt, wobei die verwendeten Reinigungsparameter meist auf Erfahrungswerten beruhen. Die Anpassung des Reinigungsprozesses an neue Produkte sowie Änderung des Anlagenaufbaus ist oft schwierig und erfordert teilweise umfangreiche und dadurch kostenintensive Reinigungsversuche an der Produktionsanlage. [Lorenzen, 2016]

Bei der CIP-Reinigung sind mehrere Stofftransportprozesse und Reaktionen relevant, darunter der Stofftransport des Reinigungsmittels in die Verschmutzung, das Ablösen der Verschmutzung und auch der Stofftransport der Verschmutzung in das

Reinigungsmittel [Landel und Wilson, 2021]. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels der verschiedenen Transportprozesse sowie der vielfältigen Interaktionen zwischen dem verwendeten Reinigungsmittel und der zu entfernenden Verschmutzung, ist die CIP-Reinigung nach wie vor nicht ausreichend gut verstanden, um allgemeingültige Modelle aufstellen zu können. Die Kenntnis des jeweils geschwindigkeitslimitierenden Stofftransportschrittes bzw. der Reaktion ist für eine sinnvolle Optimierung des Reinigungsprozesses aber erforderlich.

Für eine Reihe von Modellverschmutzungen wurden in der Vergangenheit teils widersprüchliche, experimentelle Untersuchungen zu den einzelnen Transportprozessen bei der Reinigung veröffentlicht, z. B. Goederen et al. [1989], Bird und Fryer [1991], Gillham et al. [1999], Dürr und Wildbrett [2000], Beck et al. [2005], Jensen und Friis [2005], Hofmann [2007], Schöler [2011], Pérez-Mohedano et al. [2017]. Eine Vielzahl davon beschäftigt sich mit der Reinigung von Milch und Milchbestandteilen. Insbesondere die Abreinigung partikulärer Verschmutzungen und der dabei auftretende Stofftransport wurden bisher nicht ausreichend untersucht. Ziel dieser Arbeit ist daher die experimentelle und theoretische Untersuchung des Stofftransports partikulärer Verschmutzungsschichten bei der CIP-Reinigung. Insbesondere wird der Frage nachgegangen, ob der Partikeltransport von der Oberfläche ins Reinigungsmittel vorwiegend durch diffusive oder konvektive Kräfte verursacht wird und welchen Einfluss die verwendete Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Natronlaugekonzentration auf den Partikeltransport besitzen.

Am Beispiel einer Eigelbverschmutzung werden dazu Reinigungsuntersuchungen im Labormaßstab mit integrierter Partikelgrößenmessung im Reinigungsmittelrücklauf und ein Modell der benötigten Reinigungszeit in Abhängigkeit der Reinigungsparameter vorgestellt. Die Auswertung der Partikelgrößenverteilungen der abgereinigten Eigelbpartikel mit der Mie-Theorie gibt Aufschluss über den Durchmesser der Partikel und ermöglicht dadurch weiterführende Berechnung zum Partikeltransport. Der diffusive Partikeltransport wird sowohl aus experimentellen Daten als auch der Stokes-Einstein-Gleichung abgeschätzt. Zudem wird der Diffusionskoeffizient des Reinigungsmittels in die Eigelbschicht aus experimentellen Daten der Schichtdickenänderung während des Quellprozesses in Abhängigkeit der Reinigungsparameter ermittelt.

Die Aufstellung des allgemeinen Kräftegleichgewichts an runden Partikeln und dessen mathematischer Beschreibung ermöglichen die Entwicklung der Bewegungsgleichungen des Partikeltransports durch die viskose Unterschicht. Diese bilden ein Differentialgleichungssystem 2. Ordnung, welches numerisch gelöst werden kann und so die Berechnung der Partikeltrajektorie durch die viskose Unterschicht möglich macht. Die Simulation der Partikelbewegung für verschiedene Reinigungsparameterkombinationen kann anschließend zur Bewertung der einzelnen Einflussgrößen sowie zur Bestimmung des diffusiven und konvektiven Anteils am Stofftransport herangezogen werden.



Durch den Vergleich der modellierten benötigten Reinigungszeit zur Entfernung von 95 % der Verschmutzungsschicht mit der Geschwindigkeit des Partikeltransports durch die viskose Unterschicht können Hinweise über den geschwindigkeitslimitierenden Stofftransportschritt in Abhängigkeit der verwendeten Reinigungsparameter gewonnen werden. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die Reinigung einer Stärkeverschmutzung zeigt Analogien und Unterschiede zwischen den Reinigungsmechanismen dieser beiden Modellsysteme auf.

## 2 Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Wissens zu den lebensmitteltechnologischen, verfahrenstechnischen, chemischen und auch physikalischen Grundlagen dieser Arbeit beleuchtet. Im Fokus steht dabei das, zum Verständnis der Arbeit, wichtigste grundlegende Fachwissen aus den unterschiedlichen Bereichen, welches im Folgenden unter Verwendung der relevantesten Quellen zusammengefasst wird. Zunächst werden das Cleaning-in-Place in geschlossenen Systemen als betrachteter Reinigungsprozess sowie die Partikelbewegung in strömenden Fluiden und die Diffusion als Stofftransportprozesse erläutert. Zudem werden die Grundlagen der Partikelgrößenmessung mittels Laserbeugung beschrieben. Anschließend folgen Überlegungen zu den Anforderungen an Modellverschmutzungen für Reinigungsuntersuchungen sowie einige häufig in der Literatur verwendete Modellsysteme. Schließlich werden grundlegende Informationen zu den in dieser Arbeit verwendeten Modellsystemen Eigelb und Stärke angegeben.

### 2.1 Cleaning-in-Place

Unter Cleaning-in-Place (CIP) wird die Reinigung von lebensmitteltechnologischen, pharmazeutischen oder allgemein verfahrenstechnischen Anlagen ohne vorherige Demontage von Anlagenteilen verstanden. Der große Vorteil gegenüber dem Cleaning-out-Place und der mechanischen Reinigung besteht darin, dass die Reinigung vollautomatisch durchgeführt werden kann. Dadurch können auch Anlagenteile gereinigt werden, die nur schlecht zu demontieren sind, wie z. B. Rohrleitungen, Ventile, Pumpen und Wärmeübertrager. Aber auch für Tanks setzt sich die CIP-Reinigung zunehmend durch, wobei hier spezielle Spritzköpfe zur Erzeugung von Flüssigkeitsstrahlen zum Einsatz kommen. [Thor und Loncin, 1978; Wildbrett, 2006; Sansebastiano et al., 2007; Lorenzen, 2016]

Das Cleaning-in-Place ist in der Lebensmittelindustrie weit verbreitet und besteht in der Regel aus fünf Schritten [Sansebastiano et al., 2007; Walton, 2008; Tamime, 2008; Kluge, 2010]:

1. Vorspülen mit Wasser
2. Reinigung
3. Spülen mit Wasser
4. Desinfektion
5. Nachspülen mit Wasser

In anlagenspezifischen Reinigungsprotokollen werden die Temperatur, der Volumenstrom, die Dauer und ggf. die Konzentration an Reinigungsmittel für jeden Reinigungsschritt festgelegt. Dazu wird bereits bei der Inbetriebnahme der Anlage ein Worst-Case-Szenario für die Verschmutzung mit dem späteren Produkt betrachtet