

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 CO₂-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

und das entwickelte Reinigungsprotokoll daran getestet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf den besonders schwer zu reinigenden Anlagenteilen. Eine spätere Änderung des zu produzierenden Produktes und/oder der Anlagenbetriebsweise (wie z. B. Temperaturen, Volumenstrom) erfordert in der Regel auch eine erneute Reinigungsvalidierung. Zudem muss die gesamte Anlage nach den Prinzipien des Hygienic Design ausgeführt sein, um Ablagerungen und Mikroorganismenwachstum zu minimieren. [EHEDG, 2016; Lorenzen, 2016]

Die Flüssigkeiten für die Reinigungs- und Spülschritte werden oft rezykliert und in CIP-Stapeltanks gelagert. Auf diese Weise kann neben dem Volumen an Wasser auch die eingesetzte Menge an Reinigungsmitteln geringgehalten und somit Kosten für Beschaffung und Entsorgung minimiert werden. Der Verschmutzungsgrad der einzelnen eingesetzten Flüssigkeiten muss dabei überwacht werden, um den richtigen Zeitpunkt für die endgültige Entsorgung festzustellen. [Sansebastiano et al., 2007; Lloyd, 2008; Kluge, 2010]

2.1.1 Grundlagen der CIP-Reinigung in geschlossenen Systemen

Der Reinigungseffekt beim Cleaning-in-Place beruht auf thermodynamischen sowie chemischen Mechanismen. Ziel ist es, die Verschmutzung entweder in die gelöste Form zu überführen (z. B. bei Salzen) oder die thermodynamische Bindung der Verschmutzungspartikel aneinander (Kohäsion) bzw. am Substrat (Adhäsion) soweit zu verringern, dass ein strömungsbedingtes Ablösen der Verschmutzung möglich wird. [Wildbrett, 2006]

Der Reinigungsprozess wird daher durch die drei Komponenten Verschmutzung, Substrat und Reinigungsmittel beeinflusst. Jede der Komponenten bringt mehrere Eigenschaften bzw. Prozessparameter mit, die für den Reinigungsprozess eine Rolle spielen. Im erweiterten Sinnerschen Kreis nach Dürr und Wildbrett [2006] (siehe Abbildung 2-1) sind die in Reinigungsprozesse involvierten Einflussgrößen kreisförmig dargestellt. Mit dieser Darstellungsweise soll visualisiert werden, dass alle genannten Größen gemeinsam zum Reinigungserfolg beitragen. Soll eine Größe verringert werden, müssen eine oder mehrere andere Größen erhöht werden, damit das gleiche Reinigungsergebnis erreicht werden kann. [Dürr und Wildbrett, 2006]

Im Reinigungsprozess selbst können aber nur die Reinigungsparameter, die direkt mit dem Reinigungsmittel zusammenhängen, gewählt werden. Das sind die Temperatur, die Fluidmechanik, die Chemie des Reinigungsmittels und die Reinigungszeit. Die Eigenschaften der Verschmutzung (wie Art, Menge und Zustand) können, wenn überhaupt, ausschließlich über den Produktionsprozess, der zur Verschmutzung der Anlage führt (Foulingbildung), beeinflusst werden. Die Eigenschaften des Substrates werden bereits beim Bau der Produktionsanlage festgelegt und lassen sich nachträglich in den meisten Fällen nicht mehr verändern. Beim Neubau einer Produktionsanlage sollten daher das Hygienic Design sowie die verwendeten Materialien und ggf. eine Oberflächenbehandlung bedacht werden. Neben dem Oberflächenmaterial

und damit der Oberflächenenergie hat auch die Rauheit einen großen Einfluss auf das spätere Reinigungsverhalten einer Oberfläche. [Dürr und Wildbrett, 2006]

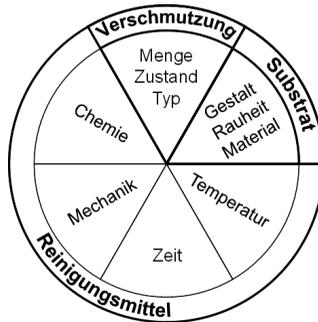


Abbildung 2-1: Erweiterter Sinnerscher Kreis nach Dürr und Wildbrett [2006].

Die vier durch das Reinigungsmittel mitgebrachten Reinigungsparameter Temperatur, Volumenstrom bzw. Fluidmechanik, chemische Zusammensetzung des Reinigungsmittels und Reinigungszeit beeinflussen in vielfacherweise den Reinigungsprozess und die dabei ablaufenden Stofftransportmechanismen. Die Temperatur ist unter anderem für die Diffusionsgeschwindigkeit sowie die Geschwindigkeit von chemischen und enzymatischen Reaktionen zwischen Reinigungsmittel und Verschmutzung entscheidend. Die Fluidmechanik, insbesondere die durch das strömende Fluid aufgeprägte Wandschubspannung, wird durch den verwendeten Volumenstrom an Reinigungsmittel erzeugt und induziert damit das Ablösen von Teilen der Verschmutzung. Die chemische Zusammensetzung des Reinigungsmittels führt zu chemischen und enzymatischen Reaktionen zwischen dem Reinigungsmittel und der Verschmutzung und ermöglicht häufig dadurch erst den Abtrag. Die Reinigungszeit, also die Kontaktzeit des Reinigungsmittels mit der Verschmutzung, ist vor allem für die zur Abreinigung notwendigen Reaktionen und den Stofftransport von entscheidender Bedeutung. [Dürr und Wildbrett, 2006; Lewis, 2008; Lorenzen, 2016]

2.1.2 Reinigungskinetik beim Cleaning-in-Place

Für die mathematische Modellierung von Reinigungsprozessen kann sowohl die Abnahme der Restverschmutzung auf dem Substrat als auch die Zunahme der bereits abgereinigten Verschmutzung im Reinigungsmittel über die Reinigungszeit betrachtet werden. Als Reinigungsrate r_R wird die abgetragene Schmutzmenge pro Zeiteinheit definiert und als Reinigungsgrad s_R der zeitliche Verlauf der Restverschmutzungsmenge auf dem Substrat verstanden. Welche der beiden Größen betrachtet wird, hängt unter anderem von der verwendeten Methodik beim Monitoring des Reinigungsverlaufs ab.

Mit einer der ersten Veröffentlichungen zu Reinigungskinetiken stammt von Bourne und Jennings [1963], die sich mit der mathematischen Beschreibung der Reinigung einer Verschmutzung aus synthetischem Tristearin unter Verwendung von Natronlauge als Reinigungsmittel beschäftigten. Die experimentell gefundene Abreinigungskurve beschrieben sie durch zwei unabhängige Reaktionen erster Ordnung. Auch Schlübler [1976] sowie Thor und Loncin [1978] haben herausgefunden, dass die Schmutzentfernung sich bei den von ihnen untersuchten Systemen durch die Gleichung einer Reaktion erster Ordnung beschreiben lässt:

$$m_s(t) = m_{s,0} \cdot e^{-k_R t} \quad (2-1)$$

m_s : Schmutzmenge pro Flächeneinheit

$m_{s,0}$: Schmutzmenge pro Flächeneinheit zum Zeitpunkt $t = 0$ s

k_R : Geschwindigkeitskonstante der Reinigung

t : Reinigungszeit

Als neuerer Ansatz zur Beschreibung von Reinigungsprozessen wurde das Weibull-Modell von Dürr und Wildbrett [2000] vorgeschlagen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Abreinigung jeweils dort erfolgt, wo die Schmutzpartikel gerade den geringsten Widerstand gegenüber dem Abtrag aufweisen und somit die günstigsten Bedingungen herrschen. Unter Verwendung der Weibull-Verteilung kann also eine Haftdauer-Verteilung des Schmutzes im Reinigungsprozess ermittelt werden. Der Reinigungsgrad s_R kann im Weibull-Modell durch Gleichung (2-2) beschrieben werden. [Dürr und Graßhoff, 2001; Dürr und Wildbrett, 2006]

$$s_R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_R}\right)^{R_R}} \quad (2-2)$$

T_R : Zeitkonstante der Reinigung

(Zeit, um $s_R(t) = 63,2$ % zu erreichen)

R_R : Steilheit der Reinigungscharakteristik.

Mit dieser mathematischen Gleichung können alle typischen Verlaufsformen von Reinigungsprozessen dargestellt werden (siehe Abbildung 2-2). Für die Darstellung im Weibull-Netz wird Gleichung (2-2) umgestellt und zweimal logarithmiert. Dadurch werden aus den Reinigungskurven Geraden mit der Steigung R_R . Im Weibull-Netz ist auf der Abszisse die logarithmierte Reinigungszeit $\lg(t)$ und auf der Ordinate der doppelt logarithmierte und umgerechnete Reinigungsgrad aufgetragen $\lg(\lg(1/(1 - s_R(t))))$. [Dürr und Graßhoff, 2001; Dürr und Wildbrett, 2006]

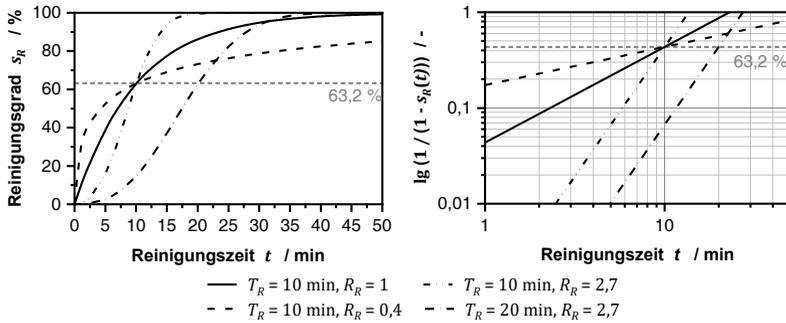


Abbildung 2-2: Ideale Typen von Reinigungsverläufen nach Dürr und Wildbrett [2006]. Links: Darstellung mit linearen Achsen. Rechts: Darstellung im Weibull-Netz.

Mithilfe des Weibull-Modells lässt sich zudem die Referenzzeit t_{ref} , die zum Erreichen eines definierten Reinigungsgrades $s_{R,\text{ref}}$ notwendig ist, als Kenngröße für Reinigungsprozesse berechnen (siehe Gleichung (2-3)). Üblich ist zum Beispiel die Angabe von t_{95} , also der Reinigungszeit, die zur Entfernung von 95% der Verschmutzung notwendig ist. [Dürr und Graßhoff, 2001; Dürr und Wildbrett, 2006]

$$t_{\text{ref}} = T_R \left(\ln \left(1 / (1 - s_{R,\text{ref}}) \right) \right)^{1/R_R} \quad (2-3)$$

Neben dem Reinigungsgrad ist auch die Reinigungsrate $r_R(t)$ eine wichtige Größe zur Beschreibung von Reinigungsprozessen. Sie ist als 1. Ableitung des Reinigungsgrads $s_R(t)$ nach der Zeit definiert und beschreibt die zeitliche Änderung der abgetragenen Masse. Bezieht man die Reinigungsrate $r_R(t)$ auf die Restschmutzmenge, so erhält man die relative Reinigungsrate $r_{R,\text{rel}}(t) = r_R(t)/s_R(t)$. [Dürr und Wildbrett, 2006]

Unter Zuhilfenahme der Steilheit R_R können drei unterschiedliche Typen an Reinigungsprozessen definiert werden [Dürr und Wildbrett, 2006]:

1. Konstante relative Reinigungsrate ($r_{R,\text{rel}}(t) = 1/T_R$ bzw. $R_R = 1$): Der Reinigungsverlauf entspricht einer einfachen Exponentialfunktion.
2. Monoton sinkende relative Reinigungsrate ($R_R < 1$): Die Verschmutzung lässt sich mit zunehmender Reinigungszeit immer schlechter entfernen.
3. Monoton steigende relative Reinigungsrate ($R_R > 1$): Die Verschmutzung lässt sich, z. B. durch Quellung der Verschmutzung, mit zunehmender Reinigungszeit besser entfernen.

Reinigungsverläufe wurden in großer Zahl anhand von Modellsystemen untersucht und können oft in mehrere Phasen eingeteilt werden, wie beispielsweise von Bode et al. [2006] die Abreinigung von Proteinablagerungen (vgl. Abbildung 2-3). Hier

ist die absolute Reinigungsrate über der Reinigungszeit dargestellt und wurde in drei zeitlich aufeinanderfolgende Phasen unterteilt. Die Phase 1 ist dabei die Quellphase, in der das Reinigungsmittel in die Verschmutzungsschicht hinein diffundiert. In der Phase 2 ist die Reinigungsrate konstant und es wird mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit ein Großteil der Verschmutzung von der Oberfläche entfernt. In der Phase 3 kommt es dann zu einer deutlichen Abnahme der Reinigungsrate, da bereits große Teile der Oberfläche abgereinigt sind und der Aufwand zur Entfernung der restlichen Verschmutzung stark zunimmt. [Bode et al., 2006]

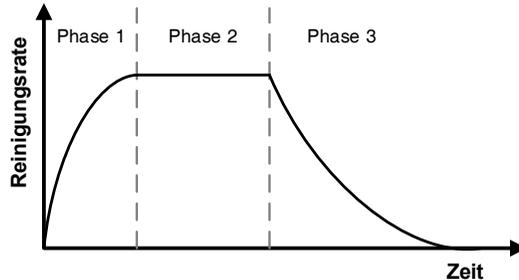


Abbildung 2-3: Charakteristischer zeitlicher Verlauf der Reinigungsrate für eine Proteinverschmutzung nach Bode et al. [2006].

2.1.3 Stofftransportmechanismen beim Cleaning-in-Place

Bei der CIP-Reinigung spielen eine ganze Reihe von Stofftransportmechanismen eine Rolle. Manche davon laufen zeitgleich ab und viele zeigen über die Reinigungszeit eine Änderung der Geschwindigkeit, wodurch der Prozess insgesamt sehr komplex ist. Im Folgenden soll eine Übersicht über die wichtigsten Stofftransportmechanismen gegeben werden.

Während eines Reinigungsprozesses interagieren drei Medien miteinander: das Substrat, die Verschmutzung und das Reinigungsmittel. Vor Beginn der Reinigung haftet die Verschmutzung auf dem Substrat (Adhäsion) und innerhalb der Verschmutzung wirken in der Regel Kräfte, die zum Zusammenhalten der Partikel, Moleküle oder des Netzwerks führen (Kohäsion).

Mit Beginn der Reinigung kommt als drittes Medium das Reinigungsmittel hinzu. Bei der CIP-Reinigung überströmt es die Verschmutzung bzw. das Substrat, je nach Bedeckungsgrad, und bildet ein Strömungsprofil aus. Nun können auch die ersten für die Reinigung relevanten Stofftransportvorgänge und Reinigungsreaktionen starten. Zunächst muss das Reinigungsmittel an die Grenzschicht zur Verschmutzung transportiert werden. Dies erfolgt aus der Kernströmung zunächst konvektiv und in Wandnähe diffusiv. Anschließend findet meist eine Diffusion in die Verschmutzung statt. Dort kommt es häufig chemische Reaktionen zwischen Reinigungsmittel und Verschmutzung. Abgelöste Verschmutzungspartikel oder -fragmente werden dann in die Strömung des Reinigungsmittels transportiert. Wobei bisher unklar ist, wann

dieser Transport in Wandnähe diffusiv und wann konvektiv erfolgt. Außerhalb der viskosen Unterschicht der Strömung erfolgt dann ein konvektiver endgültiger Abtransport der Verschmutzung. Schöler [2011] hat die Modellvorstellung dieser Stofftransportprozesse bei der CIP-Reinigung, am Beispiel der Abreinigung einer Stärkeverschmutzung, visualisiert (siehe Abbildung 2-4).

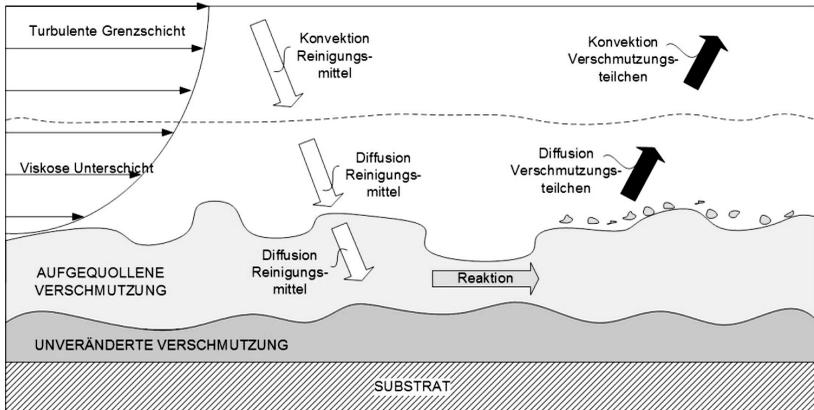


Abbildung 2-4: Modellvorstellung der Stofftransportvorgänge während der Reinigung. [Schöler, 2011]

Die Reinigungsreaktionen umfassen sowohl physikalische bzw. physiko-chemische Reaktionen, wie das Schmelzen, Benetzen, Dispergieren, Ablösen, Auflösen und Quellen, als auch chemische Reaktionen. Häufig auftretende chemische Reinigungsreaktionen sind z. B. die Hydrolyse (Spaltung einer chemischen Bindung durch Reaktion mit Wasser), die Peptisation (Wiederauflösung eines Kolloids), die Verseifung (Spaltung eines Esters durch Hydroxidionen), das Lösen und auch die Komplexbildung. [Marriott und Gravani, 2006; Kluge, 2010]

Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzung

Bei Reinigungsprozessen tritt meist eine Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzungsschicht auf. Abhängig von der Verschmutzungsschicht und der chemischen Zusammensetzung des Reinigungsmittels kann dies zur Quellung oder auch Schrumpfung der Verschmutzungsschicht führen. Dabei werden die chemischen und rheologischen Eigenschaften sowie die innere Struktur der Verschmutzung verändert, was wiederum zum leichteren Abtrag der Verschmutzung führen kann, aber nicht zwangsläufig muss. Oft entstehen dabei zwei sich bewegende Fronten, einerseits das Reinigungsmittel, das in die Verschmutzung diffundiert und andererseits die Verschmutzungsschicht, die in die entgegengesetzte Richtung entfernt wird. [Dürr und Wildbrett, 2006; Landel und Wilson, 2021]

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von experimentellen Quellungsuntersuchungen für unterschiedliche Modellsysteme, Reinigungsmittel und Temperaturbereiche.