

## Zusammenfassung zum Schlussbericht

### Experimentell gestützte Basismodelle für die industriegerechte numerische Reinigungssimulation (Basismodelle Reinigungssimulation - BaRes)

---

Ziel des Projektes war es, für die verschiedenen Reinigungsmechanismen von Verschmutzungen geeignete numerische Modelle zu entwickeln bzw. weiterzuentwickeln, die sich durch eine gute Vorhersagequalität bei der Bestimmung der Reinigungsdauer sowie für KMU praktikable Rechenzeiten auszeichnen. Der verfolgte Lösungsansatz kombiniert die Strömungssimulation (CFD) der Reinigungsflüssigkeit für eine beliebige Gestalt des Reinigungsgutes mit einer Randbedingung, die das Verhalten der Verschmutzung modelliert. Die versagensartspezifischen Modelle sollten unter Nutzung der in früheren Projekten gewonnenen Erkenntnisse und Messdaten, ergänzt durch weitere experimentelle und numerische Untersuchungen an geometrisch einfachen Testfällen, entwickelt und erprobt werden.

Die vier Reinigungsmechanismen diffusives Auflösen, kohäsives Trennen, viskoses Verschieben und adhäsives Abtrennen sind eine aus den vorangegangenen Projekten zur übergreifenden Thematik „Industriegerechte Reinigungssimulation“ entwickelte und inzwischen, auch in der Industrie fest etablierte Modellvorstellung, die die komplexe Thematik unterteilt und einer Beschreibung zugänglich macht.

Für das diffusive Auflösen/kohäsive Trennen wurde der bestehende Ansatz aus den IGF-Projekten „Entwicklung eines Prozessmodells für die Strahlreinigung in der Lebensmittelindustrie 1+2“ (17805 N, 18733 BR) weiterentwickelt. Der ursprüngliche Ansatz bedingt sowohl die Auflösung der Grenzschicht für den Stofftransport als auch der Strömungsgrenzschicht. Da sich deren Ausdehnung um eine Größenordnung unterscheiden wurde das Modell um eine Wandfunktion für den Stofftransport erweitert. Im Ergebnis konnten Reinigungssimulationen im ebenen Kanal mit einer um den Faktor 32 reduzierten Auflösung bei gleichbleibender Vorhersagequalität durchgeführt werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die industrielle Anwendbarkeit der numerischen Modelle durch KMU wegen der praktikablen Rechenzeiten eine signifikante Verbesserung des bisherigen Modells. Eine Übertragung auf andere Testfälle ist numerisch erfolgt und wurde im Rahmen des Projekts anhand weiterer Reinigungsversuche validiert.

Für das viskose Verschieben konnte für Vaseline bei Raumtemperatur mit Wasser im Rahmen der experimentellen Möglichkeiten kein ausreichender Reinigungserfolg erreicht werden. Weitere Versuche zeigten, dass eine Temperaturerhöhung zielführend, aber experimentell nur insofern realisierbar ist, dass eine instationäre Erwärmung der Vaselineschicht stattfindet. Eine isotherme Versuchsdurchführung bei erhöhter Temperatur entspräche darüber hinaus nicht der industriellen Praxis. Diese Diskrepanz zwischen instationärer Temperaturänderung im Experiment und zunächst angenommener und modellierter Temperaturkonstanz bei der Simulation wird auch durch eine signifikante Abweichung zwischen den jeweils bestimmten Reinigungszeiten deutlich. Die

Forschungseinrichtungen haben sich daher in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss entschieden, abweichend vom ursprünglichen Konzept die instationäre Erwärmung und damit die Temperaturabhängigkeit von Modellparametern bereits im laufenden Projekt zu bearbeiten. Ein erstes Fließmodell mit temperaturabhängigen Koeffizienten konnte dazu erstellt werden. Zunächst wurde mit dem Fließmodell ein Modell zur Reinigungsvorhersage für die Vaseline generiert. Das Modell wurde anhand von Reinigungsversuchen in einer Kanalströmung validiert. Auch dieses Reinigungsmodell wurde ausschließlich durch Laborversuche parametrisiert. Anhand des Modells konnten die wesentlichen Anforderungen an ein Randbedingungsmodell für das viskose Verschieben herausgearbeitet werden. Für dessen Umsetzung kann die in OpenFOAM vorhandene Möglichkeit der Vorgabe einer Wandgleitgeschwindigkeit genutzt werden.

Für das adhäsive Abtrennen konnte die Zielstellung am Beispiel einer Ketchupverschmutzung vollständig erreicht werden. Der Quellvorgang der Ketchupverschmutzung wurde anhand von Schichtdickenmessungen analysiert und in ein numerisches Modell überführt. Mit den Informationen zum Schichtdickenwachstum können die Versuchsparameter beim Bindungskraftversuchsaufbau gezielt eingestellt werden und somit der Verlauf der kohäsiven Bindungskräfte durch eine gequollene Schmutzschichtdicke ortsaufgelöst gemessen werden. Durch Variation der Einweichdauer und optische Bewertung der verbliebenen Restschmutzmenge kann adhäsives Versagen detektiert und somit die Adhäsionskraft in Abhängigkeit vom Wassermasseanteil beschrieben werden. Diese beiden Teilmodelle wurden in das numerische Abtragmodell implementiert und ermöglichen eine Vorhersage der lokalen Reinigungszeit. Dazu wird anhand der zuvor berechneten Strömung die Diffusion von Wasser in die Schmutzschicht berechnet und der lokale Wassermasseanteil bestimmt. Aus den wirkenden Druck- und Schubspannungen (Stirnfläche und Oberseite der Schmutzschicht) wird, auch in Abhängigkeit der Dicke der quellenden Schicht, eine Vergleichsspannung berechnet. Wenn diese die vom lokalen Wassermasseanteil abhängige Adhäsionskraft überschreitet, kommt es zum Abtrennen und konvektiven Abtransport der Verschmutzung. Durch die entkoppelte Berechnung von Strömung und Verschmutzungsverhalten sind auch für dieses Modell für KMU praktikable Rechenzeiten gegeben. Das Modell wurde anhand der lokalen Reinigungszeiten in der ebenen Kanalströmung und dem Kanalsprung für verschiedene Schmutzmengen und Strömungsgeschwindigkeiten sowie bei teilverschmutzten Oberflächen für verschiedene Verschmutzungslängen und -abstände erfolgreich validiert.

Mit Blick auf die anspruchsvolle Zielstellung Modelle zu generieren, die ausschließlich von Laborversuchen parametrisiert werden können, wurde im Rahmen des Projektes das Modell für das adhäsive Abtrennen auf kohäsive trennende Verschmutzungen erweitert. Das Modell wurde für Stärkeverschmutzung getestet, die erzielten Resultate sind vielversprechend. Mit diesem neu formulierten Modell ist die Grundlage zur Modellierung der Transition zwischen den Reinigungsmechanismen adhäsiven Abtrennen und kohäsives Trennen gelegt, welche im Fokus des Folgeprojektes steht. Mit den in den Modellen enthaltenen temperatur- bzw. konzentrationsabhängigen Eigenschaften der Verschmutzung ist auch die Brücke zum viskosen Verschieben vorbereitet.

Die Gesamtheit aller bisher erreichten und avisierten Ziele der Thematik „Industriegerechte Reinigungssimulation“ verdeutlicht die systematische, kontinuierliche und zugleich zielorientierte Herangehensweise.

IVLV-Mitglieder können den vollständigen Projektabschlussbericht auf unserer Homepage herunterladen. Hierzu ist nur eine Anmeldung in der Rubrik [„Meine IVLV“](#) erforderlich. Nicht-Mitglieder können den Abschlussbericht bei der IVLV-Geschäftsstelle unter [office@ivlv.org](mailto:office@ivlv.org) anfordern.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Das IGF-Vorhaben 19968 BG der Forschungsvereinigung Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e. V. – IVLV, Giggenhauser Str. 35, 85354 Freising, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) und –entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.