

# Algorithmen zur Vorhersage der Mischqualität



**Zuverlässige Vorhersagetools und genaue Messverfahren sind unerlässlich für eine innovative und schnelle Produktentwicklung. Im Falle von Mischanwendungen fehlt es handelsüblichen Simulationstools an der notwendigen Geschwindigkeit und Genauigkeit. Daher hat Sulzer ein eigenes Tool zur zuverlässigen Vorhersage der Mischqualität entwickelt.**

Mischvorgänge finden überall um uns herum statt – auf der Erde, in der Atmosphäre, in den Ozeanen und sogar in unserem Körper. Die Reduzierung der Inhomogenität und das Mischen unterschiedlicher Stoffe ist auch ein wesentlicher Bestandteil vieler Prozesse in der chemischen, pharmazeutischen, Bau-, Nahrungsmittel- und allgemeinen Industrie. Der effiziente Einsatz von Zwei- und Mehrkomponenten-Materialien braucht neue Mischlösungen. Die Entwicklung von Verfahren und Systemen zum Austragen, Kontrollieren und Optimieren von Mischvorgängen ist ein wichtiger Bestandteil der Expertise von Sulzer Applicator Systems.

Das Aufkommen neuer Werkstoffe in vielen Bereichen und Branchen in den vergangenen Jahrzehnten macht neue Produktions- bzw. Applikationsverfahren erforderlich. Gleichzeitig hat die Verwendung von Mehrkomponenten-Lösungen für Füll-, Dicht- und Klebeaufgaben erheblich zugenommen. Heute nutzen zahlreiche Kunden die hoch effizienten Lösungen von Sulzer zum Mischen und Auftragen verschiedener Dicht- und Klebstoffe. Die Produkte decken eine breite Palette von Anwendungen ab, die vom Gesundheits- bis zum Bauwesen und vom Heimwerken bis zur industriellen Fertigung reichen.

Mit dem zunehmenden Einsatz von Zweikomponenten-Materialien geht auch die Suche nach effektiveren und zuverlässigeren Applikationssystemen weiter. Bei der erfolgreichen Anwendung von Mehrkomponenten-Materialien ist und bleibt das Mischsystem ein entscheidendes Element. In bestimmten Anwendungen können die Art der Mischung und die Mischgüte einen starken Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Produkts haben, weshalb eine hohe Präzision erforderlich ist.

### Laminarer Mischvorgang

Sulzer bietet statische Mischer in verschiedenen Ausführungen für laminare Mischvorgänge an (Abb. 1 und 2). Die kompakten Geräte sind besonders kostengünstig und benutzerfreundlich, können aber bei Komponenten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften, z. B. Viskositäten, zu einem suboptimalen Ergebnis führen. Gleiches gilt, wenn von einer Komponente wesentlich mehr verwendet wird als von der anderen. Für solche anspruchsvollen Anwendungen werden häufig dynamische Mischer bevorzugt (Abb. 3). In diesen erzeugen schnell rotierende Flügel hohe Scherkräfte und ermöglichen so ein präzises Mischen und Austragen. Die beweglichen Teile dieser Mischer rotieren mit bis zu 1 500 U/min, wobei die Axialgeschwindigkeit des Materials im Mischer nur wenige Zentimeter pro Sekunde betragen kann. Sulzer bietet verschiedene dynamische Mischer für die anspruchsvollsten Mischaufgaben in verschiedenen Bereichen von Autoreparaturwerkstätten bis hin zu Zahnarztpraxen an.



Abb. 1 Statischer Mischer für Bauanwendungen.



Abb. 2 Statischer Mischer für Dentalanwendungen.



Abb. 3 Dynamischer Mischer für Dentalanwendungen.

### Produktoptimierung durch Simulation

Benötigen Sulzer-Kunden neue Mischlösungen für ihre speziellen Anforderungen, sind möglichst kurze Entwicklungszyklen gefragt. Eines der am häufigsten genutzten Verfahren bei Sulzer zur Simulation von Strömungen und deren zeitlicher Änderung ist Computational Fluid Dynamics (CFD). Damit können komplexe Phänomene wie Mehrphasenströmungs-Wechselwirkungen, Phasenumwandlung, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen usw. berücksichtigt werden. Dank der steigenden Rechenleistung und Fortschritten auf dem Gebiet der numerischen Verfahren werden Simulationen immer häufiger für die Auslegung und Optimierung in verschiedenen Bereichen eingesetzt.

Verwendet man moderne Computercluster, dauert die CFD-Berechnung für einen statischen Mischer 48–72 Stunden. Dabei entspricht die Rechenleistung eines Clusters der von 150–200 PCs. Dies zeigt, wie komplex die Berechnungen sind und wie viele Rechenressourcen für solche Anwendungen erforderlich sind. Doch trotz der Fortschritte, die mithilfe kommerzieller Software möglich geworden sind, lassen sich laminare Mischprozesse nicht exakt vorhersagen. Das laminare Mischen basiert auf der Erzeugung, Teilung und Streckung von Materialschichten innerhalb des Mixers (Abb. 4). Diese Schichten werden über die Länge des Mixers zunehmend feiner und dadurch gemischt.

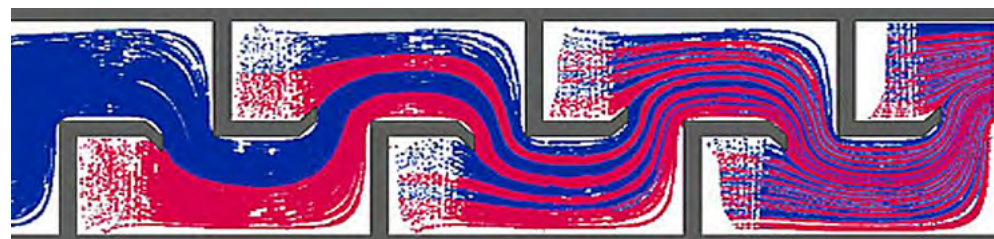


Abb. 4 Schematische Darstellung der Schichterzeugung und Mischung in einem laminaren statischen Mischer.

Diese sehr feinen Schichten können mit herkömmlichen CFD-Gittern nur unzureichend räumlich aufgelöst werden, was zu einem numerischen Fehler, der sogenannten numerischen Diffusion, führt. Diese numerische Diffusion führt zu einer Überschätzung der Mischqualität und einem verschmierten Erscheinungsbild der Mischverteilung (Abb. 6) – im Gegensatz zur Messung, bei der die klaren Grenzen zwischen den beiden Materialien noch immer erkennbar sind (Abb. 5).

### Diffusionsfreies Particle Tracking

Sulzer-Ingenieure haben in den vergangenen Jahren versucht, diese Einschränkungen zu überwinden, um den Entwicklungsprozess für Mischer zu beschleunigen und ein exakteres Mischergebnis zu erzielen.

Ein bekannter Ansatz ist die Bestimmung der Mischverteilung und des Konzentrationsfelds mithilfe von diskreten, entsprechend der Konzentration gefärbten Partikeln. Die Farben Rot und Blau in Abb. 8 stehen für unterschiedliche Konzentrationen. Mithilfe der Partikel kann berechnet werden, wie sich Materialien mit unterschiedlichen Konzentrationen durch den Mischer bewegen. Diese Methode wird Particle Tracking genannt. Sie ermöglicht eine hochauflösende Abbildung der Mischverteilung und wird bereits seit längerem für statische Mischer angewandt. Abb. 5 zeigt Mischverteilungen, wie sie durch Messungen ermittelt wurden. Abb. 6 und 7 zeigen das mit herkömmlichen CFD-Methoden bzw. mit dem Sulzer-eigenen Tool berechnete Mischergebnis.

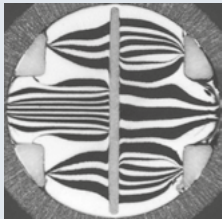


Abb. 5  
Beobachtete Mischverteilung im statischen Mischer.

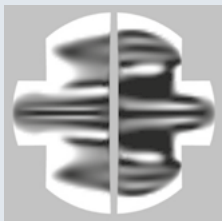


Abb. 6  
Unschärfe Felder sind das Ergebnis numerischer Diffusion bei klassischen CFD-Methoden.

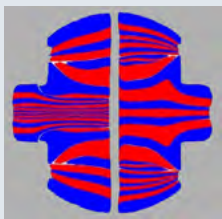
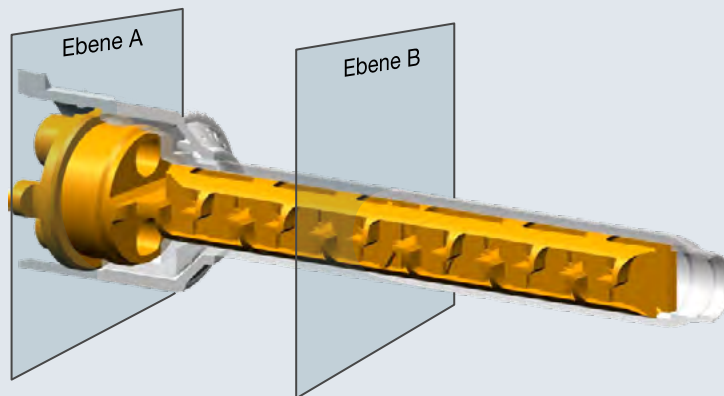
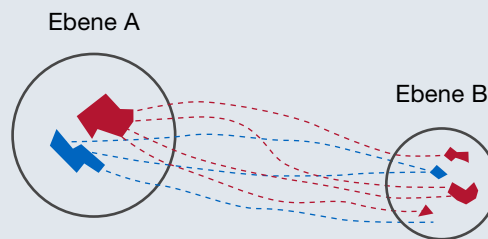


Abb. 7  
Mit dem Sulzer-eigenen Tool simulierte Mischverteilung.

#### Statischer Mischer mit den untersuchten Ebenen



#### Particle Tracking für zwei Materialien mit unterschiedlicher Konzentration



#### Berechnung der Mischverteilung mit dem Sulzer-eigenen Tool



Abb. 8 Vorhersage der Mischverteilung eines statischen Mischer mit dem Sulzer-eigenen Tool.

## Particle Tracking bei dynamischen Mixern

Anders als bei statischen Mischkanülen verändert sich bei dynamischen Mixern das Strömungsfeld im Mischer im zeitlichen Verlauf. Daher ist der bisherige Ansatz, d. h. die Offline-Verfolgung einer begrenzten Anzahl von Partikeln auf der Basis eines stationären Strömungsfelds, nicht mehr anwendbar. Neben dem instationären Strömungsfeld bringt die Mehrskaligkeit des Problems weitere praktische Herausforderungen mit sich. Der Rotor dieser Mischer dreht sich mit bis zu 1'500 U/min. Die Axialgeschwindigkeit der Strömung kann hingegen nur wenige Zentimeter pro Sekunde betragen. Die Simulation des gesamten Vorgangs einschliesslich des Befüllens des Mixers und der Erfassung der Rotation mit ausreichender Genauigkeit ist eine Herausforderung.



Video 1  
Klicken Sie hier, um ein Video einer mit herkömmlichen CFD berechneten Simulation zu sehen.

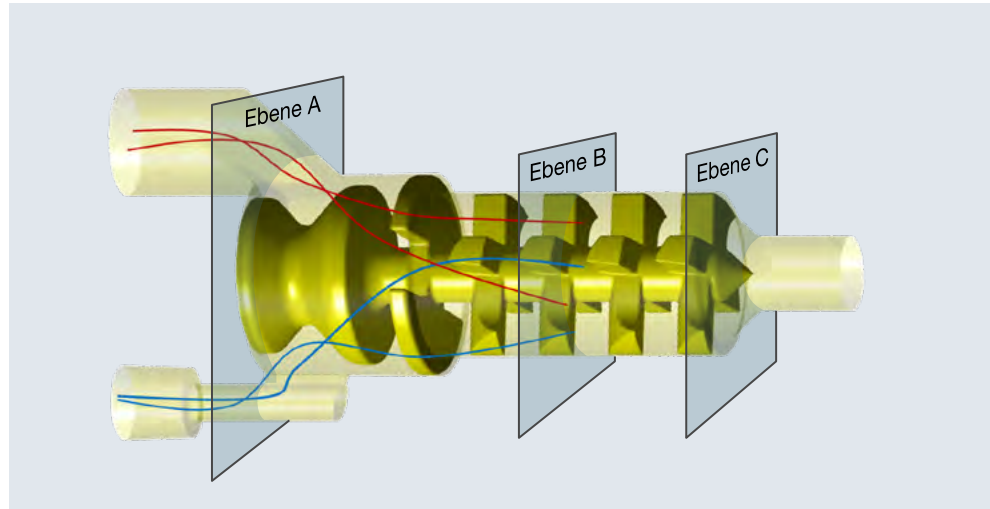


Abb. 9 Dynamischer Mischer – die blauen und roten Linien symbolisieren das Particle Tracking.



Video 2  
Klicken Sie hier, um ein Video mit realen Mischergebnissen zu sehen.

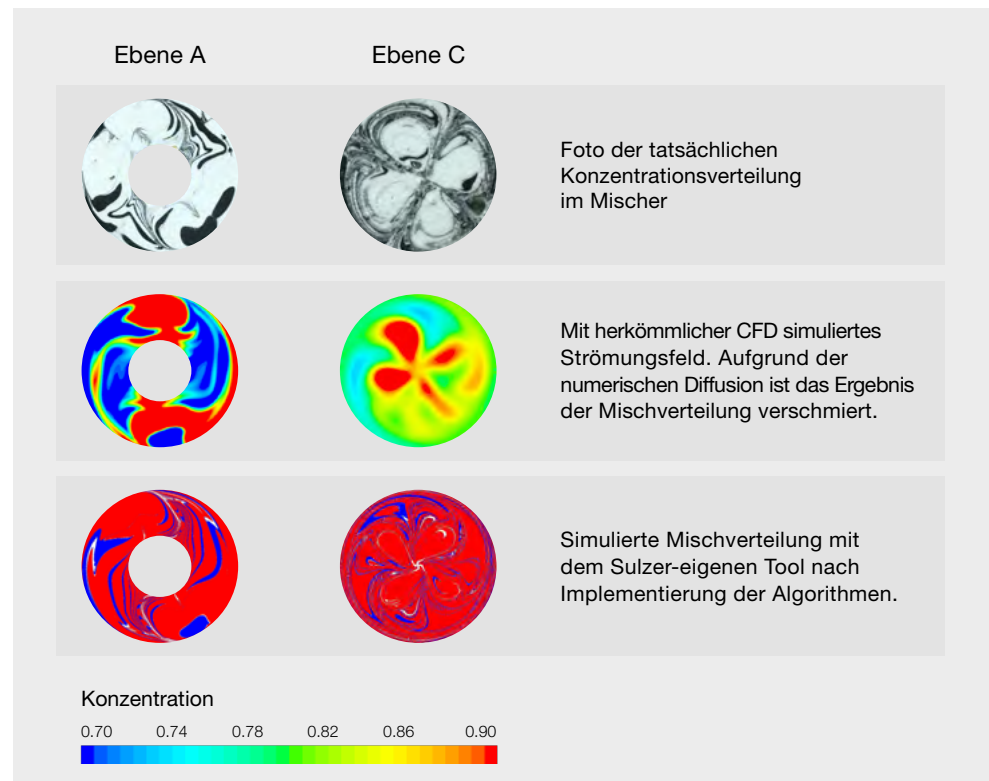


Abb. 10 Vergleich von realen Mischergebnissen eines dynamischen Mixers mit herkömmlichen CFD-Berechnungen und dem Sulzer-eigenen Tool.

## Methodik und Algorithmen

Bei früheren Ansätzen hatten die Sulzer-Ingenieure versucht, das Particle Tracking mit der Simulation der Strömungsfelder im dynamischen Mischer zu koppeln. Dieser theoretisch korrekte Ansatz scheitert jedoch daran, dass die für solche Simulationen erforderliche Berechnungszeit und Speicherkapazität die praktischen Grenzen der verfügbaren Rechenressourcen sprengen würden. Daher untersuchten die Ingenieure von Sulzer alternative Ansätze für die Offline-Kopplung von Partikeln, ähnlich denen, wie sie für statische Mischer verwendet werden. Die eigentliche Herausforderung liegt in der instationären Eigenschaft der Strömung in dynamischen Mixern.

Dieses Problem konnte dank der zeitlichen Periodizität des Strömungsfelds gelöst werden. Jeweils nach einer Umdrehung wiederholen sich die Zustände des Strömungsfelds im Mischer. So lässt sich eine Berechnung des Strömungsfelds für jede beliebige Zeitdauer ableiten. Dank dieser periodischen Wiederholung des Strömungsfelds kann eine Offline-Partikelverfolgung für dynamische Mischer mit einer begrenzten Anzahl von Partikeln durchgeführt werden. Für die Berechnung werden die Partikel in der Ebene B freigesetzt und rückwärts in Richtung Eintritt (Ebene A) verfolgt, um die Konzentration zu ermitteln.

## Verifizierung und Validierung

Bevor sie in der Produktentwicklung Anwendung finden, werden alle Sulzer-eigenen numerischen Simulationsmethoden von den Ingenieuren sorgfältig verifiziert und validiert. Dazu müssen die Mess- und Rechensysteme sorgfältig aufeinander abgestimmt sein, um einen zuverlässigen Vergleich zu ermöglichen. Die vorhergesagte Mischqualität wird mit optisch bestimmten Mischverteilungen verglichen. Die blauen und roten Linien in Abb. 9 stellen die Partikelverfolgung im dynamischen Mischer dar. Eine Simulation des Mischvorgangs in einem dynamischen Mischer – berechnet mit einem herkömmlichen CFD-Programm – ist im Video 1 zu sehen. Die Validierungsstudie bestätigt die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Methode (Abb. 10 und Video 2).



Dr. Samira Jafari,  
Haag, Schweiz



Joachim Schoeck,  
Haag, Schweiz

## Schnellere und exaktere Mischerentwicklung

Nach zahlreichen Tests und Messungen ist es den Sulzer-Ingenieuren gelungen, ein zuverlässiges Tool zu entwickeln, dem sie vertrauen. Die neu entwickelten und implementierten Algorithmen bieten die Möglichkeit, die Mischqualität in dynamischen Mixern genauer vorherzusagen. Ausserdem können die notwendigen Berechnungen innerhalb der praktischen Grenzen verfügbarer Rechenressourcen durchgeführt werden. Das Tool wird genutzt, um die Auslegung und die Optimierung von neuen und vorhandenen Produkten zu beschleunigen. Damit sind unsere Ingenieure in der Lage, innovative Designs und Lösungen für den stetig zunehmenden Einsatz von Zweikomponenten-Materialien in allen Bereichen des modernen Lebens zu realisieren.