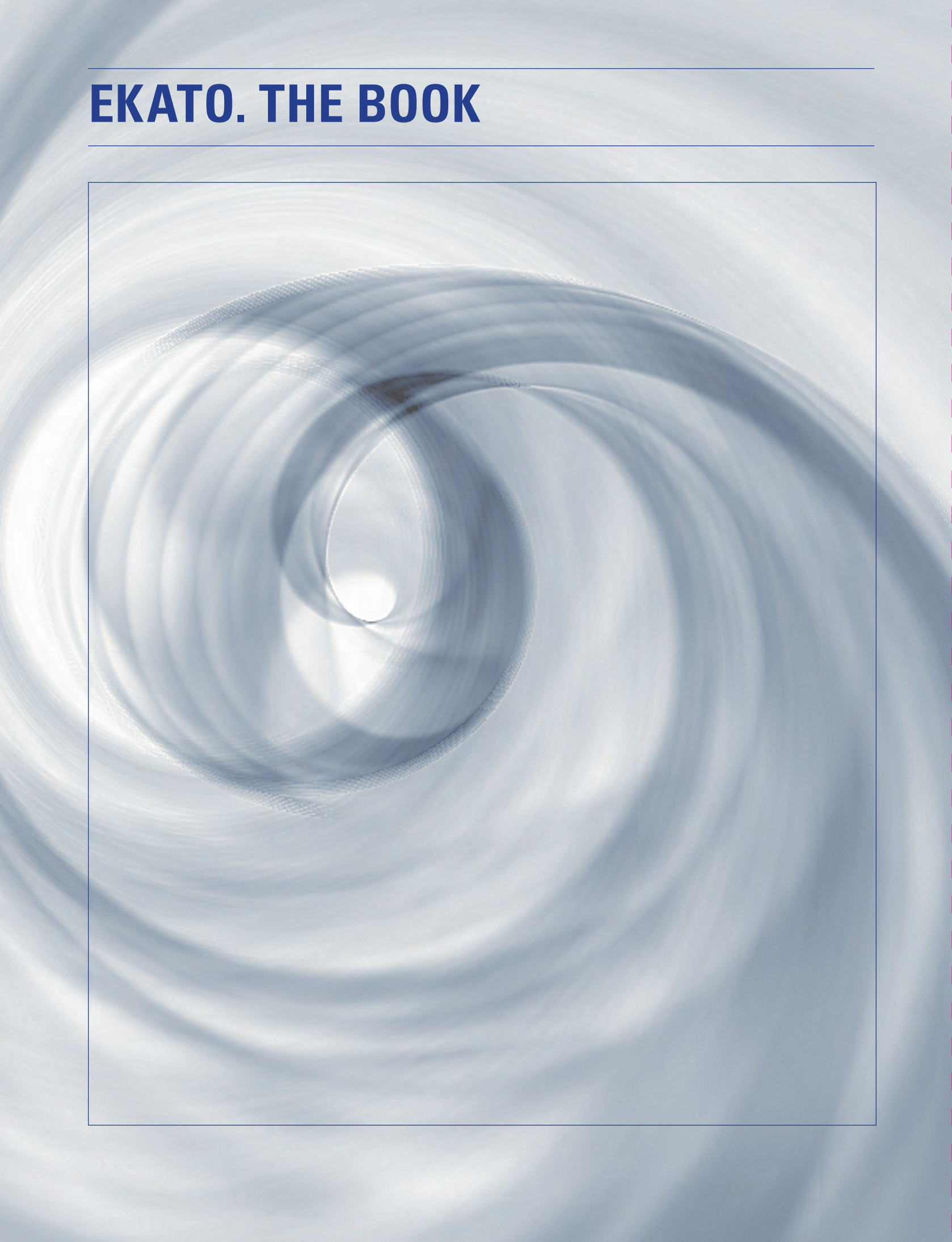
EKATO. THE BOOK



Die aus der Praxis resultierenden Beiträge wurden von Ekato-Mitarbeitern geschrieben. Sie sind eine Zusammenfassung des bei Ekato erarbeiteten Wissensstandes aus Forschung, Entwicklung, Anwendung, Konstruktion, Fertigung und Vertrieb.

Obwohl größte Sorgfalt bei der Zusammenstellung und Prüfung dieser Publikation geübt wurde, übernimmt der Herausgeber keine Verantwortung oder Haftung für Fehler oder Unterlassungen. Technische Änderungen bleiben vorbehalten.

Nachdruck, Übersetzung oder Vervielfältigung dieser Publikation in jeder Form, weder auf elektronischem noch auf mechanischem Wege, auch auszugsweise, sind nicht gestattet ohne eine vorherige schriftliche Genehmigung des Herausgebers; ausgenommen davon sind nur kurze Zitate zum Zwecke der Rezension.

Illustrationen, Beschreibungen, schematische Diagramme und andere Daten dienen nur dem Zwecke der Erklärung und der Präsentation des Textes. Sie können nicht als Vorlage oder Bestätigung von Tests verwendet werden. Der Herausgeber übernimmt keine Haftung dafür, dass der Inhalt dieser Publikation mit örtlichen, nationalen oder internationalen Bestimmungen oder Gesetzen übereinstimmt.

Alle Rechte vorbehalten.
©2012 Ekato Holding GmbH

3. Auflage
ISBN-Nr. 978-3-00-037510-1

Herausgeber:
Ekato Holding GmbH
Postfach 10 70
D-79010 Freiburg

info@ekato.com
www.ekato.com

Redaktion: Werner Himmelsbach
Lektorat: Dr. Matthias Delbrück, Dossenheim
Konzeption, Gestaltung:
qu-int. | marken | medien | kommunikation, Freiburg
Druck: Druckerei Hofmann, Emmendingen

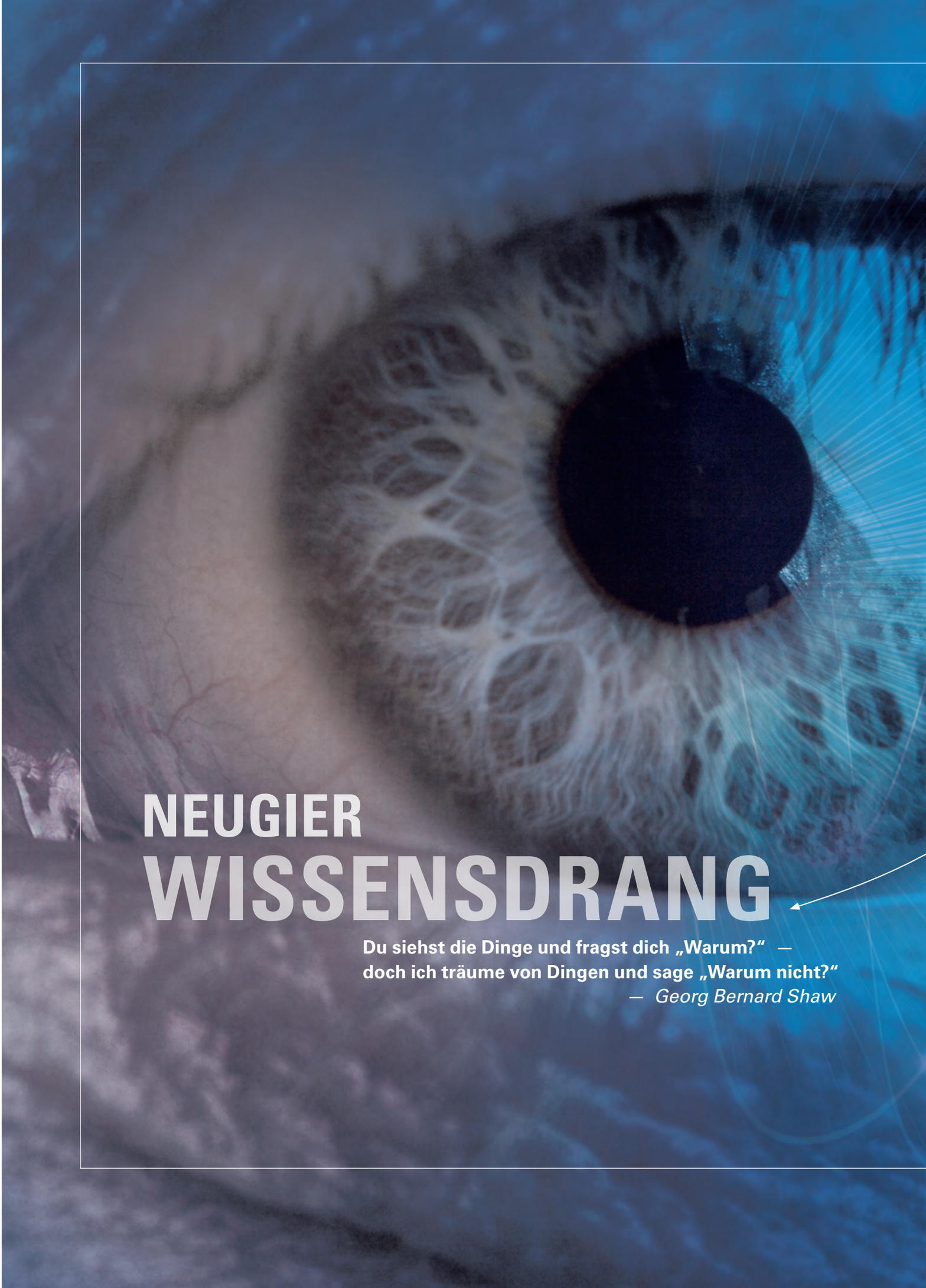
Die klassischen Grundoperationen der chemischen, thermischen und mechanischen Verfahrenstechnik, denen auch die Rühr- und Mischtechnik zuzuordnen ist, bilden nach wie vor das Rückgrat der Prozessindustrie. Neue Technologien wie z.B. die Mikroverfahrenstechnik werden sie ergänzen und abrunden, aber nicht substituieren. Im Gegenteil, man beobachtet derzeit einen Entwicklungsschub dieser „reifen" Grundoperationen, der durch die Forderungen der Industrie nach höherer Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz getrieben ist. Dies fordert nicht nur die Anlagenbetreiber und die Hersteller von Maschinen, Apparaten und Geräten. Auch für die akademische Forschung öffnet sich erneut ein lohnendes Betätigungsfeld zur Erweiterung des Verständnisses physikalisch-chemischer Vorgänge im gerührten Behälter. Dies gilt erst recht für zukunftsweisende Anwendungen mit neuen apparativen Konzepten wie z.B. die Herstellung von Nanodispersionen, für die praktische Erfahrungen erst in geringem Umfang vorliegen und die umfassende theoretische Untermauerung noch nicht abgeschlossen ist.

Die dritte Auflage des Handbuchs der Rührtechnik beschreibt zunächst die physikalischen und strömungstechnischen Grundlagen der Rührtechnik und des Feststoffmischens sowie die konstruktiven Konzepte von Rühr- und Dispergiermaschinen. Danach wird das eigentliche Rührsystem unter Einbezug aller Komponenten bis hin zur funktionsfähigen Anlage betrachtet. Neben dem klassischen Vorgehen zur Auslegung wird ein weiterer Schwerpunkt auf die Methoden der numerischen Strömungssimulation und der numerischen Strukturanalyse aller Bauteile gelegt. Dabei spannt sich der Bogen vom Anlagenkonzept bis zum sicheren und wartungsfreundlichen Betrieb. In einem dritten Teil werden dann Beispiele ausgeführter Anlagen aus den unterschiedlichsten Branchen vorgestellt. Somit wendet sich das Handbuch an Studierende ebenso wie an Verfahrensentwickler, Anlagenbauer oder Betriebsingenieure in der Prozessindustrie.

Die Beiträge zu dieser dritten Auflage haben Mitarbeiter aus den unterschiedlichsten Bereichen der EKATO GROUP verfasst. Für deren außerordentliches Engagement sei ihnen herzlich gedankt.

Wir hoffen, dass diese Neuauflage mit der gleichen Begeisterung wie die beiden Vorgänger aufgenommen wird und ihren Beitrag zum Verständnis dieser wichtigen Grundoperation leistet.

Schopfheim, im Juni 2012



NEUGIER WISSENSDRANG

Du siehst die Dinge und fragst dich „Warum?“ —
doch ich träume von Dingen und sage „Warum nicht?“
— Georg Bernard Shaw

DER KUNDE
ANFORDERUNGEN UND ANALYSE

DIE WISSENSCHAFT
GRUNDLAGEN

DIE ERFAHRUNG
AUSLEGUNG VON RÜHRSYSTEMEN

DAS KNOW-HOW
DIE BRÜCKE ZUM PROZESS

DAS ENGINEERING
VOM RÜHRWERK ZUR ANLAGE

DIE VERFÜGBARKEIT
SERVICE UND INSTANDHALTUNG

DIE MASSGESCHNEIDERTE LÖSUNG
AUSGEFÜHRTE ANLAGEN

ANHANG

S. 22 PROZESSANALYSE

S. 28 RHEOLOGIE
S. 34 DIMENSIONSLOSE KENNZAHLEN
S. 38 HOMOGENISIEREN
S. 44 SUSPENDIEREN
S. 50 DISPERGIEREN GAS-FLÜSSIG
S. 58 DISPERGIEREN FLÜSSIG-FLÜSSIG
S. 68 WÄRMEÜBERGANG
S. 74 FESTSTOFFMISCHEN
S. 78 VAKUUMKONTAKTTROCKNUNG

S. 84 VERSUCHSTECHNIK
S. 92 NUMERISCHE METHODEN, CFD
S. 102 MASSSTABSÜBERTRAGUNG

S. 110 ÜBERSICHT RÜHRORGANE
S. 114 HOCHLEISTUNGSRÜHRER
S. 120 BESONDERE AUSFÜHRUNGEN
S. 126 VERSCHLEISSSCHUTZ
S. 130 GRUNDLAGEN DER RÜHRWERKSAUSLEGUNG
S. 144 GLEITRINGDICHTUNGEN

S. 168 NUMERISCHE METHODEN, FEA
S. 176 KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN
S. 182 RÜHRORGANE
S. 188 WELLE UND LAGER
S. 196 GETRIEBE
S. 202 ELEKTRISCHE ANTRIEBE, DREHZAHL- UND LEISTUNGSREGELUNG
S. 212 RÜHRREAKTOREN ALS FUNKTIONELLE EINHEITEN
S. 232 DETAILDESIGN, SKIDS UND ANLAGEN
S. 248 WERKSTOFFE
S. 252 SCHWEISSEN

S. 256 ZUSTANDSORIENTIERTE INSTANDHALTUNG

S. 266 WORLD-SCALE-ANLAGEN
S. 272 POLYMERE
S. 280 HYDROMETALLURGIE
S. 288 SPEZIALCHEMIKALIEN
S. 294 TROCKNUNG
S. 298 BIOTECHNOLOGIE
S. 306 KRISTALLISATION
S. 310 VISKOSE MEDIEN
S. 312 SALBEN, CREMES
S. 318 NANOMATERIALIEN
S. 324 BIOETHANOL DER ZWEITEN GENERATION
S. 328 GROSSBEHÄLTER, LAGERTANKS, SIDE ENTRYS

S. 333 AUTOREN
S. 334 FORMELZEICHEN, INDIZES UND KENNZAHLEN
S. 340 LITERATUR- UND NORMENVERZEICHNIS
S. 346 SACHWORTVERZEICHNIS

Die Vorgänge in einem Rühr- oder Mischbehälter sind komplex und basieren auf den Gesetzen der Strömungs- bzw. Schüttgutmechanik. Die dreidimensionale Strömung wird von den Rührorganen aufrechterhalten und tritt mit dem Behälter selbst und seinen Einbauten in Wechselwirkung. Die klassischen Gesetze der Strömungsmechanik, insbesondere die Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls sowie die Beschreibung von innerer Reibung, Turbulenzphänomenen und rheologischen Besonderheiten genügen, um die Strömungen selbst zu charakterisieren und zu analysieren.

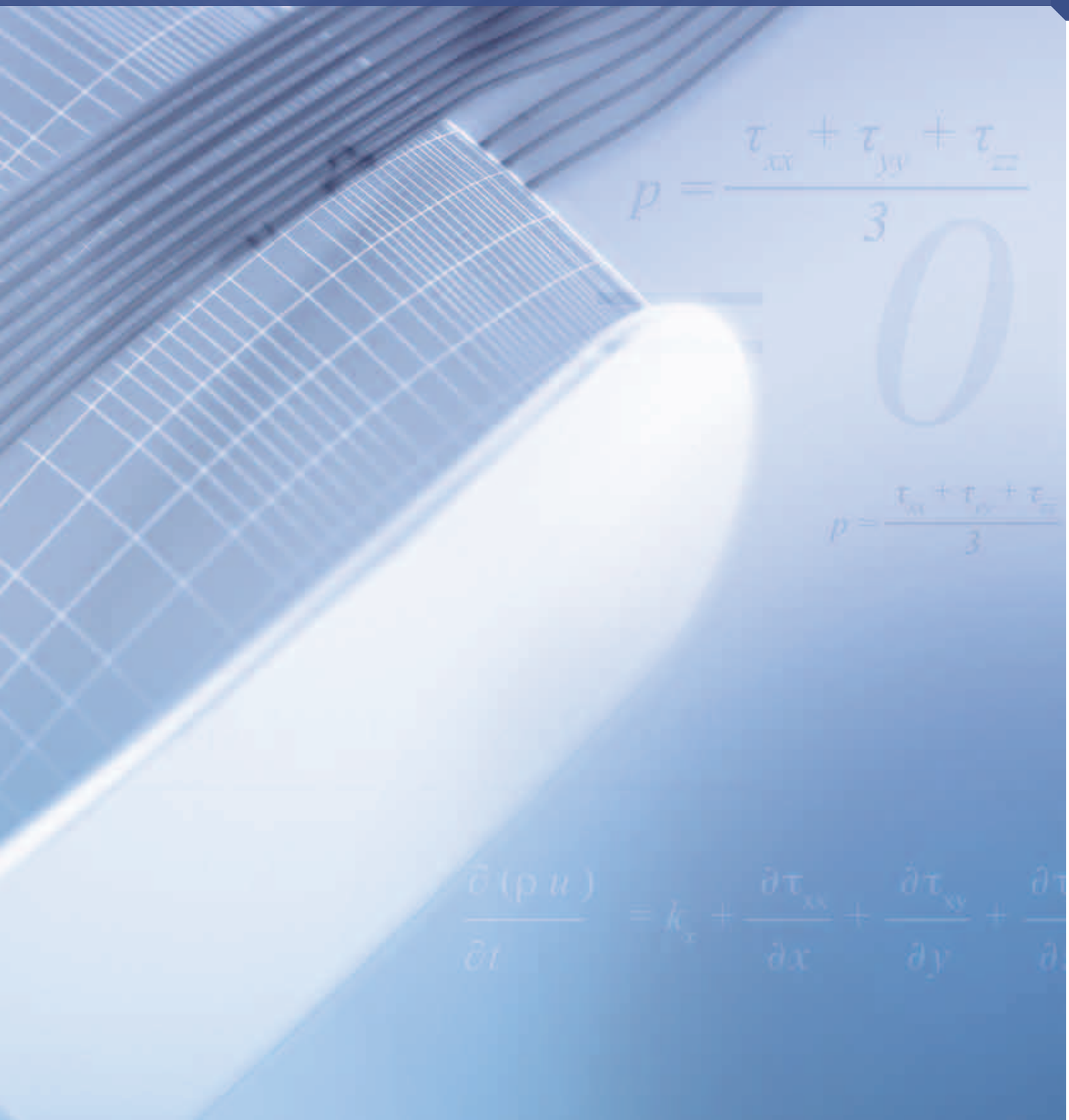
Der eigentliche Zweck des Rührens ist aber das Erzielen eines Prozessergebnisses, das auf den vielfältigsten physikalischen und chemischen Einzelvorgängen mit ihren Mechanismen und Kinetiken beruht. Flüssige, gasförmige oder feste Reaktionspartner müssen gelöst und bis auf die molekulare Ebene vermischt werden. Auskristallisierende Feststoffe sind in Schwebe zu halten und in ihrem Wachstum gezielt zu steuern. Man nutzt die Turbulenz der Strömung, um Dispersionen oder stabile Emulsionen zu erzeugen. Dabei erfordern die meisten Prozessschritte die Zu- oder Abfuhr von Wärme über die Behälterwand oder Einbauten oder auch durch Verdampfen bzw. Kondensieren von Prozessmedien.

In ihrem Zusammenspiel ist die Vielzahl solcher Einzelschritte oft schwer zu durchschauen. Man gliedert sie daher systematisch in die rührtechnischen Grundaufgaben und analysiert deren Interaktion mit der vom Rührer erzeugten Strömung und mit den einzelnen chemischen und physikalischen Prozessschritten. Die Kenntnis und das Verständnis der erfolgsrelevanten Parameter ermöglicht dann eine systematische Planung von Versuchen oder Simulationen und ist die Grundlage für das spätere Scale-up auf den Betriebsmaßstab.

DIE WISSENSCHAFT

GRUNDLAGEN

RHEOLOGIE
DIMENSIONSLOSE KENNZAHLEN
HOMOGENISIEREN
SUSPENDIEREN
DISPERGIEREN GAS-FLÜSSIG
DISPERGIEREN FLÜSSIG-FLÜSSIG
WÄRMEÜBERGANG
FESTSTOFFMISCHEN
VAKUUMKONTAKTTROCKNUNG



Der Betrieb eines Suspendierrührwerkes kann mit verschiedenen Zielsetzungen erfolgen. Zum Beispiel kann bei Waschprozessen oder für die Auflösung von Feststoffen die Aufwirbelung in Bodennähe ausreichend sein, während bei einer kontinuierlichen Betriebsweise und Hintereinanderschaltung von mehreren Behältern, z. B. in Kristallisationsbehältern oder der Erzlaugung, an die Homogenität der Suspension höchste Anforderungen gestellt werden.

SUSPENDIERZUSTÄNDE

Je nach Leistungseintrag oder Wahl des Rührorgans ergeben sich verschiedene Suspendierzustände oder Feststoffhomogenitäten über die Behälterfüllhöhe. Bei einer teilweisen Suspension (Abb. 23, links) werden zwar Partikel von der umlaufenden Strömung aufgewirbelt und suspendiert, jedoch bleibt ein Teil des Feststoffs am Boden liegen. Eine sogenannte vollständige Suspension wird erreicht, wenn der gesamte Feststoff vom Behälterboden aufgewirbelt wird bzw. das von Zwietering [152] eingeführte 1s-Kriterium erfüllt wird. Somit ist die gesamte Partikeloberfläche zugänglich und steht für Stoffaustauschvorgänge zur Verfügung. Bei einer weiteren Erhöhung der Rührerdrehzahl verbessert sich die Suspendiergüte über die Füllhöhe, bis schließlich ein theoretisch homogener Suspendierzustand erreicht wird.

Zur Charakterisierung der Homogenität einer Suspension wird typischerweise die Standardabweichung σ der Feststoffkonzentration über die Füllhöhe herangezogen, mit der Definition

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{c_{\mathrm{v},\,i}}{\overline{c}_{\mathrm{v}}} - 1 \right)^2} \quad . \qquad (32)$$

Das Erreichen einer Standardabweichung von 0,5 ist für die Erfüllung der meisten Suspendieraufgaben aus-

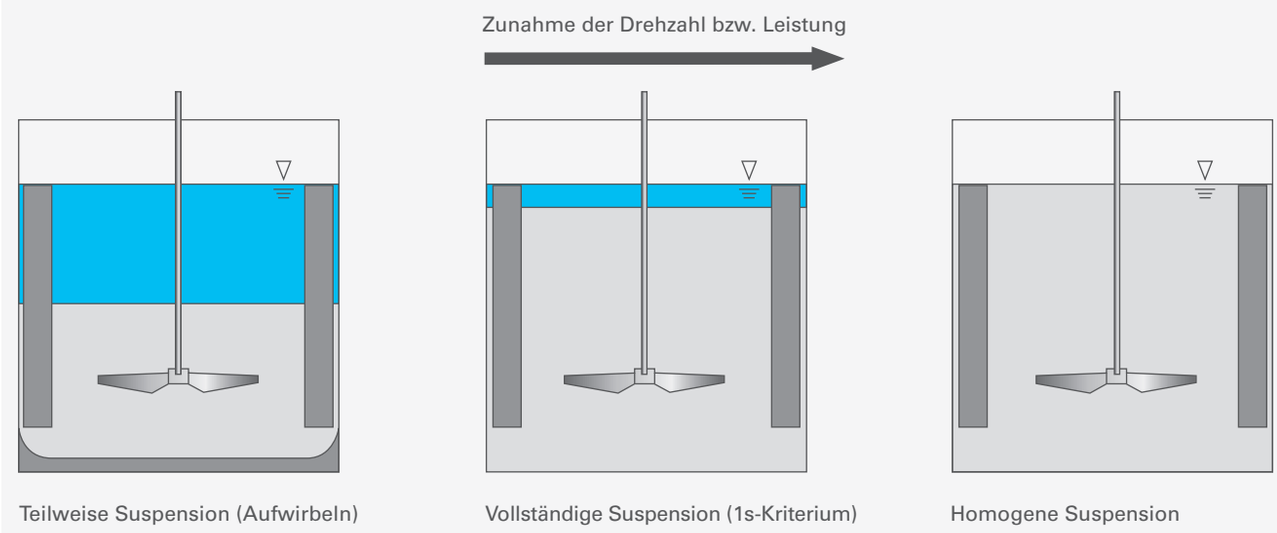


Abb. 23 Verschiedene Suspendierzustände in Abhängigkeit von der Drehzahl

reichend; hierbei ist der Boden frei von Ablagerungen und die Feststoffe erreichen die Flüssigkeitsoberfläche, wobei sich lokale Konzentrationsüberhöhungen bis zum 1,5-Fachen der Sollkonzentration einstellen können.

Um den störungsfreien Materialfluss in einer kontinuierlich betriebenen Rührkesselkaskade zu gewährleisten, sind entschieden höhere Homogenitätsgrade erforderlich. Die Dichte der Suspension an der Flüssigkeitsoberfläche darf sich nur wenig von der Dichte im Bodenbereich unterscheiden.

AUSLEGUNGSGRUNDLAGEN

CHARAKTERISIERUNG DES STOFFSYSTEMS

Die bei der Auslegung von Suspendierrührwerken zu berücksichtigenden Stoffdaten sind die

- Dichte der reinen Flüssigkeit,
- Dichtedifferenz zwischen Feststoff und Flüssigkeit,
- Viskosität der Flüssigkeit,
- Partikelgröße und die
- Feststoffkonzentration.

Diese sind in der Sinkgeschwindigkeit w_{ss} der Teilchen im Schwarm zusammengefaßt.

Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit w_s eines Einzelkorns erfolgt nach den in der einschlägigen Literatur angegebenen Methoden. Die Behinderung des Absetzvorgangs durch die Anwesenheit mehrerer Teilchen wird durch folgende Formel berücksichtigt:

$$w_{ss} = w_s \left(1 - c_v\right)^m . \qquad (33)$$

Nach einem empirischen Ansatz von Zaki [104] ergibt sich der Exponent m als Funktion der Partikel-Reynolds-Zahl

$$Re_k = \frac{d_k \cdot w_s \cdot \rho}{\eta} \qquad (34)$$

im Bereich von $0{,}5 \leq Re_k \leq 1300$ zu

$$m = 4{,}375 \cdot Re_k^{-0{,}0875} \qquad (35)$$

und bewegt sich somit zwischen 4,65 und 2,33.

ENERGETISCHE BETRACHTUNG

Geht man davon aus, daß alle Feststoffteilchen in der Flüssigkeit bereits homogen verteilt sind und gleichzeitig unter dem Einfluss der Schwerkraft zu sedimentieren beginnen, so wird eine „Sinkleistung“ frei, die sich folgendermaßen ausdrücken lässt:

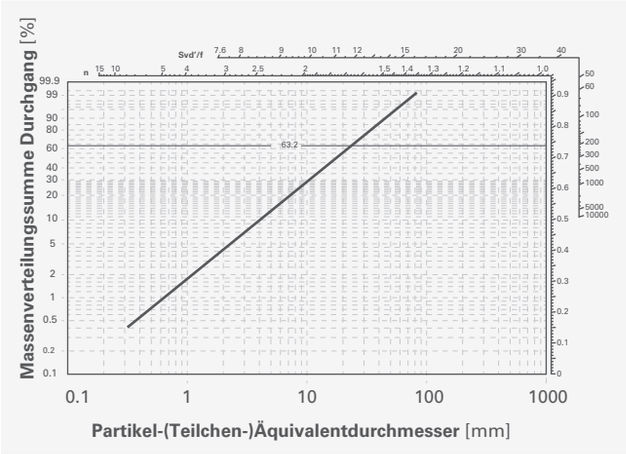


Abb. 24 Typische Partikelgrößenverteilung im RRS-Körnungsnetz

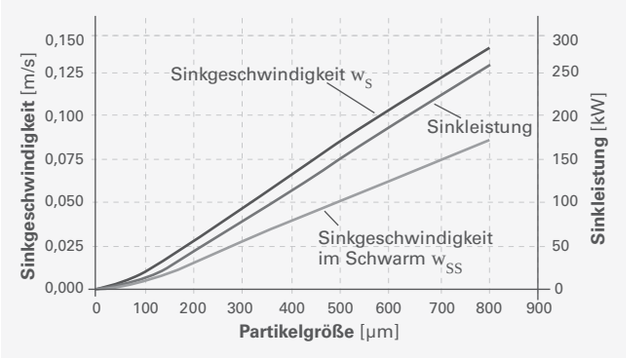


Abb. 25 Sinkgeschwindigkeiten und Sinkleistung als Funktion der Partikelgröße

$$P_{sink} = w_{ss} \cdot c_v \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot V . \qquad (36)$$

Um einen definierten Homogenitätsgrad der Suspension aufrechtzuerhalten, muss Rührleistung in die Flüssigkeit eingebracht werden, welche der Sinkleistung entgegenwirkt. Diese Rührleistung beträgt stets ein Vielfaches der Sinkleistung. Die zusätzlich erforderliche Leistung, welche zur Umwälzung des Fluids benötigt wird, kann für die meisten technischen Anwendungen vernachlässigt werden.

Da die Sinkleistung und somit auch die Rührleistung proportional zur Sinkgeschwindigkeit der Teilchen im Schwarm ist, kommt der Wahl der Auslegungskorngröße eine große Bedeutung zu.

Körnige Güter sind aufgrund ihrer Entstehung – beispielsweise durch Vermahlung – immer aus einer Vielzahl einzelner Partikel unterschiedlicher Größe und Gestalt zusammengesetzt. Die Partikelgrößenverteilung lässt sich i. A. im RRS-Körnungsnetz als Gerade darstellen. Für eine ty-

Betrachtet man ein Rührwerk vereinfacht als Maschine, dann besteht es aus zwei Hauptkomponenten: den Rührorganen, die das Prozessergebnis herbeiführen, und dem Antriebsstrang, der die Leistung für die Rührorgane zur Verfügung stellt. Der Prozess läuft in einem meist geschlossenen Behälter ab, die hermetische Trennung von Prozessraum und Umgebung übernimmt ein Dichtungssystem.

Der langjährige Trend zu einfachen Universalrührern wurde abgelöst durch individuelle Ausführungsformen von Rührorganen. Diese sind hinsichtlich ihres hydraulischen Wirkungsgrads optimiert und häufig auf die Anforderungen bestimmter Prozessschritte oder Randbedingungen zugeschnitten. Das Beherrschen dieser Typenvielfalt führt zu schnelleren Prozessabläufen, besserer Rohstoffausnutzung, höherer Produktqualität und vereinfachter Instandhaltung, allesamt Bausteine zur Steigerung des Ertrags aus dem Betrieb der Anlage.

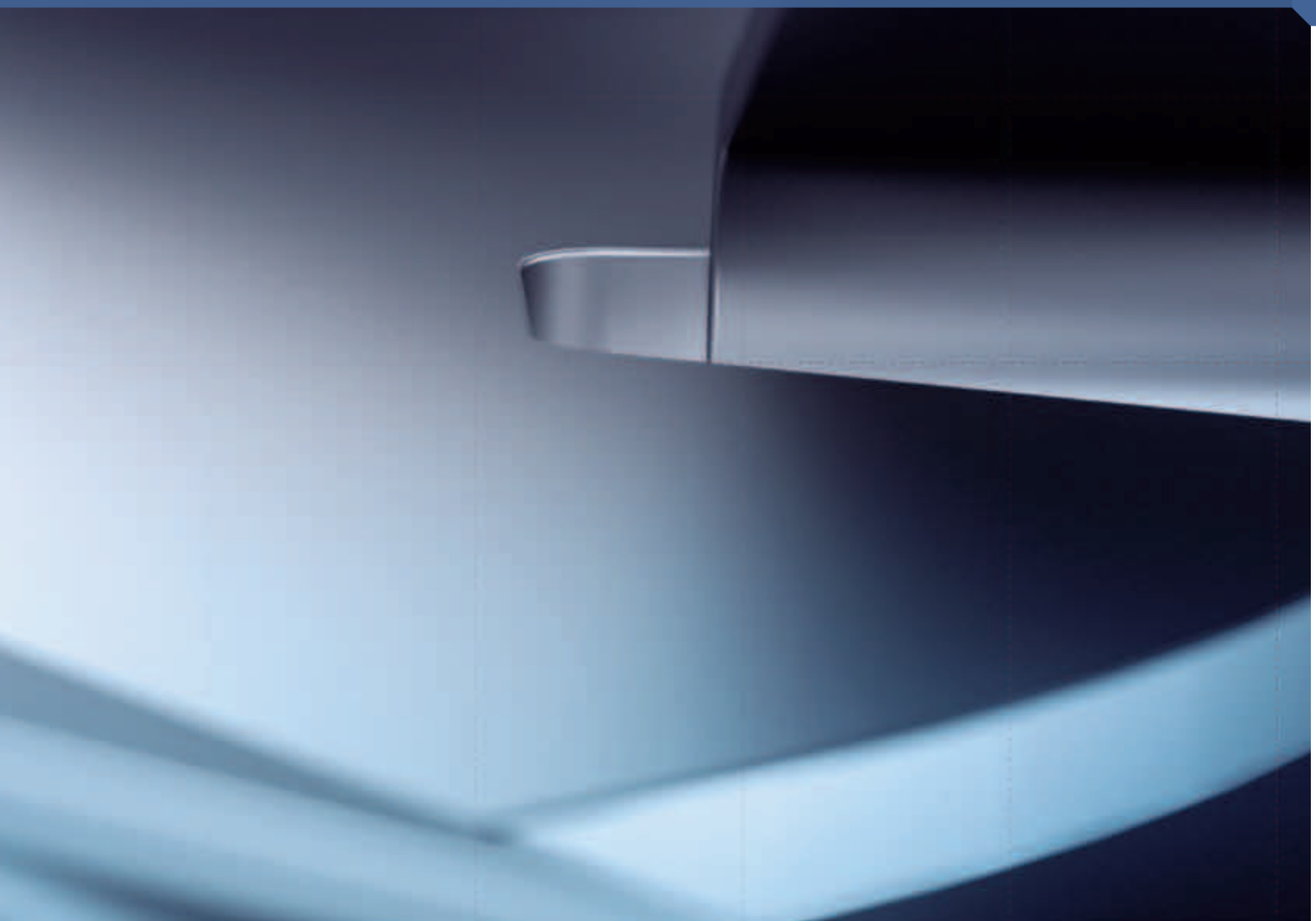
Die Komponenten der Maschine sind dynamischen Belastungen ausgesetzt, die aus dem Prozess auf den gesamten Antriebsstrang zurückwirken. Die betriebssichere Auslegung setzt zunächst die Kenntnis dieser hydraulischen Kräfte voraus, sie basiert auf Messungen und Strömungssimulationen und der korrekten Übertragung auf die Betriebsgröße. Darüber hinaus stellen Rührorgan, Welle, Lagerung, Getriebe und Antrieb ein komplexes System gekoppelter Schwingungselemente dar. Die konsequente Anwendung der Gesetze der Rotordynamik und der Physik der Schwingungsvorgänge schließt Resonanzerscheinungen sicher aus.

Die Mehrzahl der Prozesse wird mit chemisch oder biologisch aktiven Komponenten, meist bei erhöhten Temperaturen und Drücken durchgeführt. Zum Ausschluss von Gefahren für Mensch, Umwelt und Inventar muss der Prozessraum im Bereich der Durchführung der drehenden Rührwelle über die Dauer einer Betriebsperiode zuverlässig abgedichtet werden. Diese elementare Aufgabe übernimmt die Gleitringdichtung. Abhängig von der Risikobetrachtung reicht die Palette von einfachen Ausführungen bis hin zu komplexen Dichtungsanlagen mit Überwachung und redundanter Ausführung aller Funktionen. Die Zuverlässigkeit von Dichtungsanlagen basiert nicht nur auf der Qualitätssicherung bei der Herstellung. Vielmehr sind angepasste Konzepte zur Überwachung des Gerätezustands sowie für Wartung und Ersatzteilhaltung eine ebenso wichtige Voraussetzung für die sichere Abdichtung des Rührbhälters.

DAS KNOW-HOW

DIE BRÜCKE ZUM PROZESS

ÜBERSICHT RÜHRORGANE
HOCHLEISTUNGSRÜHRER
BESONDERE AUSFÜHRUNGEN
VERSCHLEISSSCHUTZ
GRUNDLAGEN DER RÜHRWERKSAUSLEGUNG
GLEITRINGDICHTUNGEN



In der Rührtechnik stellt die Abdichtung einer drehenden Rührwelle im Durchgang durch eine Behälterwand die prinzipielle Dichtungsaufgabe dar. Abhängig von den Einsatzbedingungen – Druck, Temperatur, Drehzahl usw. – kommen unterschiedliche Dichtprinzipien zum Einsatz, deren spezifische Eigenschaften hier vorgestellt werden.

RADIAL UND AXIAL WIRKENDE WELLENDICHTUNGEN

Wellendichtungen lassen sich prinzipiell in 2 Hauptgruppen einteilen: Radial wirkende und axial wirkende Dichtungen (vgl. Abb. 141). Der wesentliche Unterschied in den beiden Prinzipien besteht in der Wirkrichtung der Kontaktkräfte.

Bei radialen Wellendichtungen wird die Dichtwirkung durch radiale Kräfte bewirkt, woraus ein sich axial erstreckender zylindrischer Dichtspalt folgt. Radiale Dichtungen sind relativ unempfindlich gegenüber axialen Verschiebungen, jedoch führen radiale Wellenauslenkungen zu erhöhten einseitigen Dichtkräften, wodurch es zu Leckagen und raschem Verschleiß kommen kann. Typische Vertreter radialer Wellendichtungen sind z. B. Radialwellen-Dichtringe, Lippendichtungen oder Stopfbuchsen.

Im Gegensatz dazu wirken bei axialen Wellendichtungen die Dichtkräfte axial. Dadurch ergibt sich eine horizontale Dichtfläche mit konzentrischem Kreisquerschnitt. Konstruktionsbedingt sind axiale Wellendichtungen relativ unempfindlich gegenüber radialen Wellenauslenkungen und deswegen gut geeignet für Rührwerksanwendungen. Axiale Verschiebungen müssen konstruktiv mit elastischen Elementen kompensiert werden. Gleitringdichtungen sind den axialen Wellendichtungen zuzuordnen.

STOPFBUCHSEN

Stopfbuchspackungen sind historisch gesehen eines der ältesten Dichtelemente. Der umgangssprachliche Name „Stopfbuchse“ stammt aus den Anfängen des Dampfschiffbaus, als man die Wellendurchführung durch den Schiffsrumpf noch mit fettgetränkten Lappen abdichtete, welche zwischen Stevenrohr und Gehäuse „gestopft“ wurden [134].

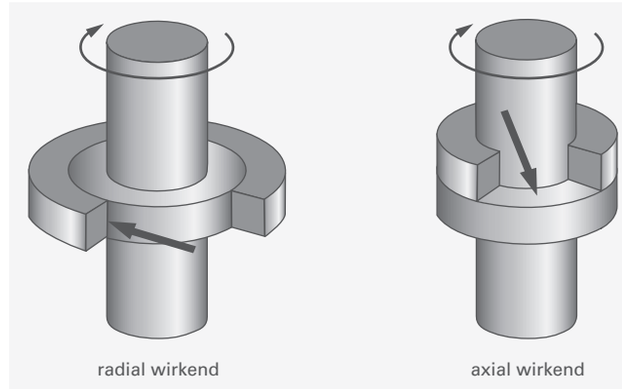


Abb. 141 Radial und axial wirkende Wellendichtungen

In den Anfängen der Rührtechnik war die Stopfbuchse ebenfalls die Abdichtung der Wahl.

Sie wurde jedoch ab den 1950er Jahren zunehmend von den Gleitringdichtungen verdrängt und führt heute bei den Rührwerken nur noch ein „Nischendasein“. Steigende Umweltauflagen z. B. durch die TA Luft [27] und zunehmender Abbau von Wartungspersonal bei den Anwendern werden die Stopfbuchse wahrscheinlich in Zukunft ganz aus den Anlagen der chemischen Industrie verschwinden lassen.

Der Hauptnachteil der Abdichtung eines Rührbehälters mittels Stopfbuchsdichtung besteht darin, dass sich durch Abrieb der Packungsringe ein Spalt zwischen Rührwelle und Packung bildet, der die Wellendurchführung labyrinthartig mehr oder weniger gut abdichtet. Die Abdichtwirkung hängt dabei hauptsächlich davon ab, wie oft das Bedienpersonal die Brille nachspannt. Es ist unmöglich, eine zuverlässige Angabe über zu erwartende Leckageraten zu machen.

Umfangreiche Informationen zu Materialfragen, Einsatzbedingungen, Reibkoeffizienten sowie Sonderkonstruktionen finden sich bei [134].

LIPPENDICHTUNGEN

Lippendichtungen werden in der Rührtechnik sowohl als axial wie auch als radial wirkende Wellendichtungen eingesetzt.

Axial dichtend wirken Topfmanschetten, welche axial verschiebbar auf der Rührwelle angeordnet werden. Die auf dem Montageflansch laufende Lippe der Topfmanschette kann zwar nur Behälter abdichten, die unter atmosphärischen Bedingungen betrieben werden, jedoch kann sie die Rührwerksumgebung vor Dämpfen, Brüden o. Ä. schützen.

Radial wirkende Lippen – meistens aus einem modifizierten PTFE-Material hergestellt – werden in der Rührtechnik auch zum Abdichten von Rührbehältern eingesetzt. Diese Wellenlippendichtungen müssen jedoch mit relativ aufwendigen Lagerungen versehen werden, um die Auslenkungen der Rührwelle im Dichtgehäuse im Bereich von etwa 0,01 mm zu halten. Nur so können die Lippen auch noch bei Drücken bis 6 bar zuverlässig betrieben werden.

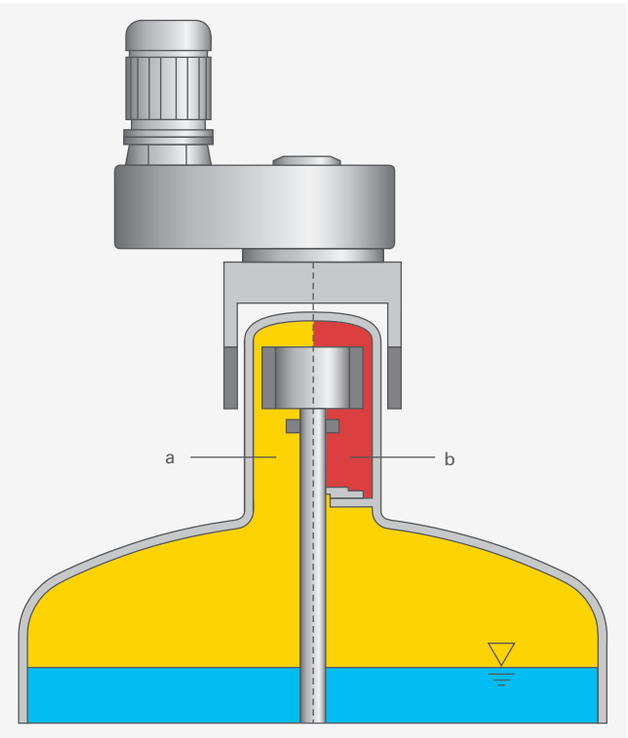


Abb. 142 Hermetische Rührwerkdichtung

HERMETISCHE ABDICHTUNG

Um einen Rührbehälter mit statischen Dichtungen hermetisch abdichten zu können, muss die Rührenergie durch die geschlossene Behälterwand übertragen werden können. Wie sich aus Abb. 142 ersehen lässt, wird bei „Magnetrührwerken“ das Antriebsdrehmoment mittels permanentmagnetischer Kräfte durch einen Spalttopf übertragen.

Diese Antriebsart gehört bei Chemiepumpen schon lange zum Stand der Technik.

Da der Spalttopf fest mit dem Rührbehälter verbunden ist, befindet sich die Rührwellenlagerung innerhalb des Produktraums. Eine handelsübliche Wälzlagerung mit Fettschmierung verbietet sich damit schon von selbst. Prinzipiell gibt es 2 Ansätze, um das Lagerungsproblem im Gasraum des Rührbehälters zu lösen:

- der Einsatz von keramischen Wälzlagern, z. B. aus Zirkonoxid (Abb. 142 a), oder
- das Abtrennen des Lagerraums vom Behälterraum mit einer Gleitringdichtung, damit handelsübliche Wälzlager mit Öl geschmiert werden können (vgl. Abb. 142 b).

Ekato favorisiert die zweite Lösung mit Gleitringdichtung und Öl im Lagerraum, da mit der zusätzlichen Trenndichtung auch der innere Magnet vor aggressiven Produkten geschützt werden kann. Außerdem kann das Schmiermittel Öl bei dieser Lösung für Kühlungs- und Überwachungszwecke genutzt werden. Falls das Rührprodukt nicht kompatibel mit dem Mineralöl sein sollte, kann die unvermeidliche Leckage durch die Gleitringdichtung in den Produktraum (einige ml/Tag) mit einer Fangschale aufgefangen und abgeführt werden.

GLEITRINGDICHTUNGEN

Die Bezeichnung hermetisch ist Dichtsystemen vorbehalten, die als Sicherheitsbarriere nur statische Dichtelemente benutzen. Im Gegensatz dazu gelten Gleitringdichtungen mit dynamischen Dichtelementen als technisch dicht ([27], [179]), wenn mit einer Drucküberlagerung ein positives Druckgefälle zwischen der Sperrkammer der Gleitringdichtung und dem Produkt im Behälter aufrechterhalten werden kann.

Die ersten Gleitringdichtungen werden in US-Patentschriften von 1913 und 1919 erwähnt[134]. Es dauerte dann jedoch bis in die 1950er Jahre, bis Gleitringdichtungen auch in der Rührwerkstechnik eingesetzt wurden. Die Firma Ekato gehörte zu den Pionieren beim Einsatz von Gleitringdichtungen bei Rührwerken und stellt bis heute selbst Gleitringdichtungen her.

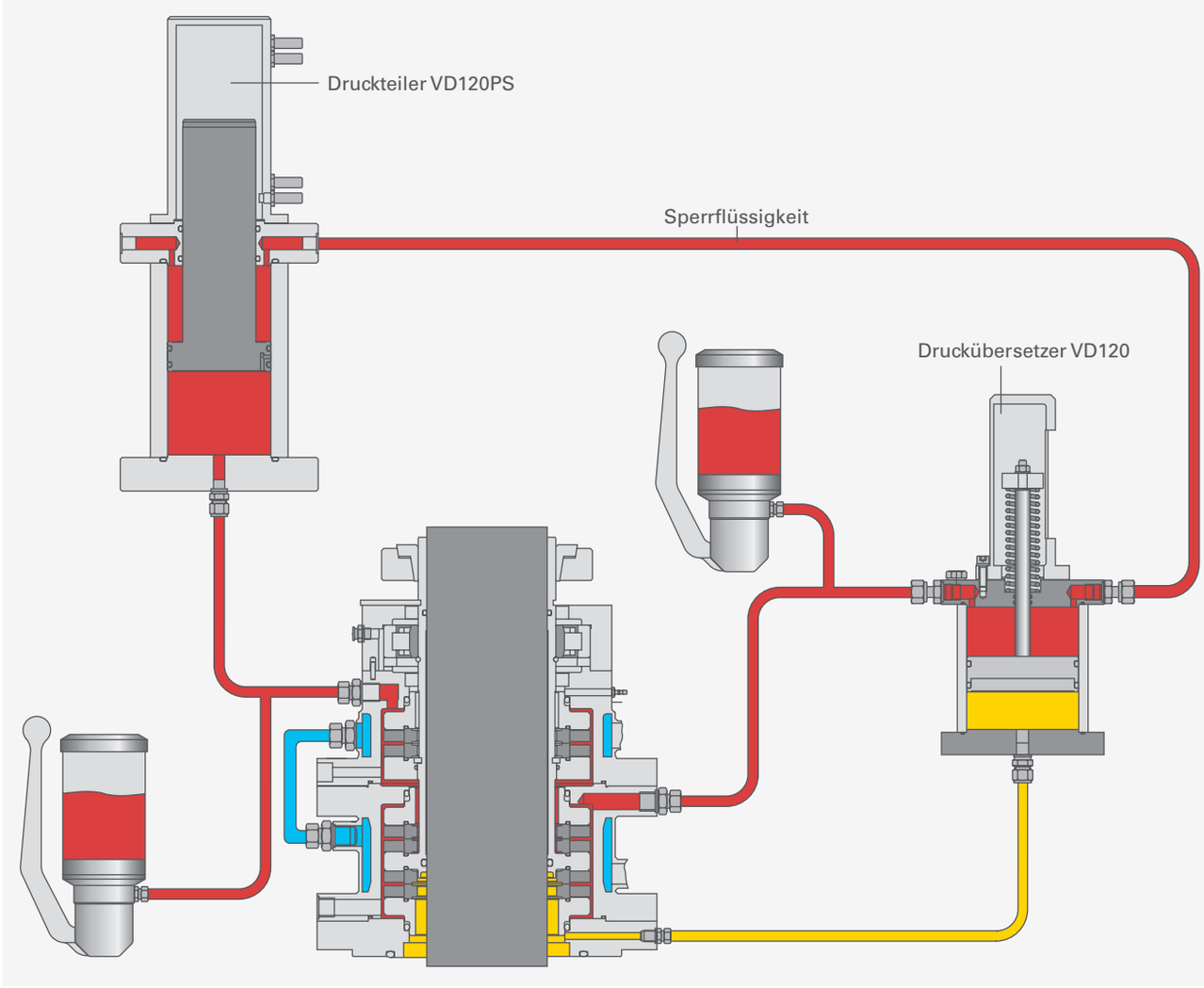


Abb. 156 Dreifachwirkende Gleitringdichtung mit Druckteilerinstallation

kende Gleitringdichtungen werden für folgende Einsatzfälle verwendet:

1. Die Gleitringdichtung wird wie eine doppeltwirkende Dichtung betrieben und die obere Sperrkammer läuft als Notfalldichtung drucklos mit. Wenn die mittlere Dichtung zu stark leckt, kann die Produktion mit der dritten Dichtung bis zum nächsten Stillstand fortgesetzt werden.

2. Die Gleitringdichtung wird mit einer Druckteiler-Installation betrieben (Abb. 156), bei der mittels eines speziell ausgebildeten Drucküberset zers der Druck in der oberen Sperrkammer nur halb so hoch wie in der unteren ist. Damit kann ein im Vergleich zu doppeltwirkenden Gleitringdichtungen doppelt so hoher Behälterdruck abgedichtet werden, da der Druck sich auf zwei Dichtstellen verteilt. Auf diese Weise sind Abdichtungen bis 200 bar möglich.

3. Für Rührbehälterdrücke bis 200 bar werden dreifachwirkende Gleitringdichtungen mit speziellen Versorgungssystemen für den Nachschub an Sperrflüssigkeit eingesetzt, welche die während des Betriebs verbrauchte Sperrflüssigkeit kontinuierlich ersetzen.

GLEITRINGDICHTUNGSSYSTEME

Gleitringdichtungen werden i. A. als Komponenten des Maschinenbaus bezeichnet. In einer Pumpe wird z. B. die Gleitringdichtung als Dichtungskomponente verbaut.

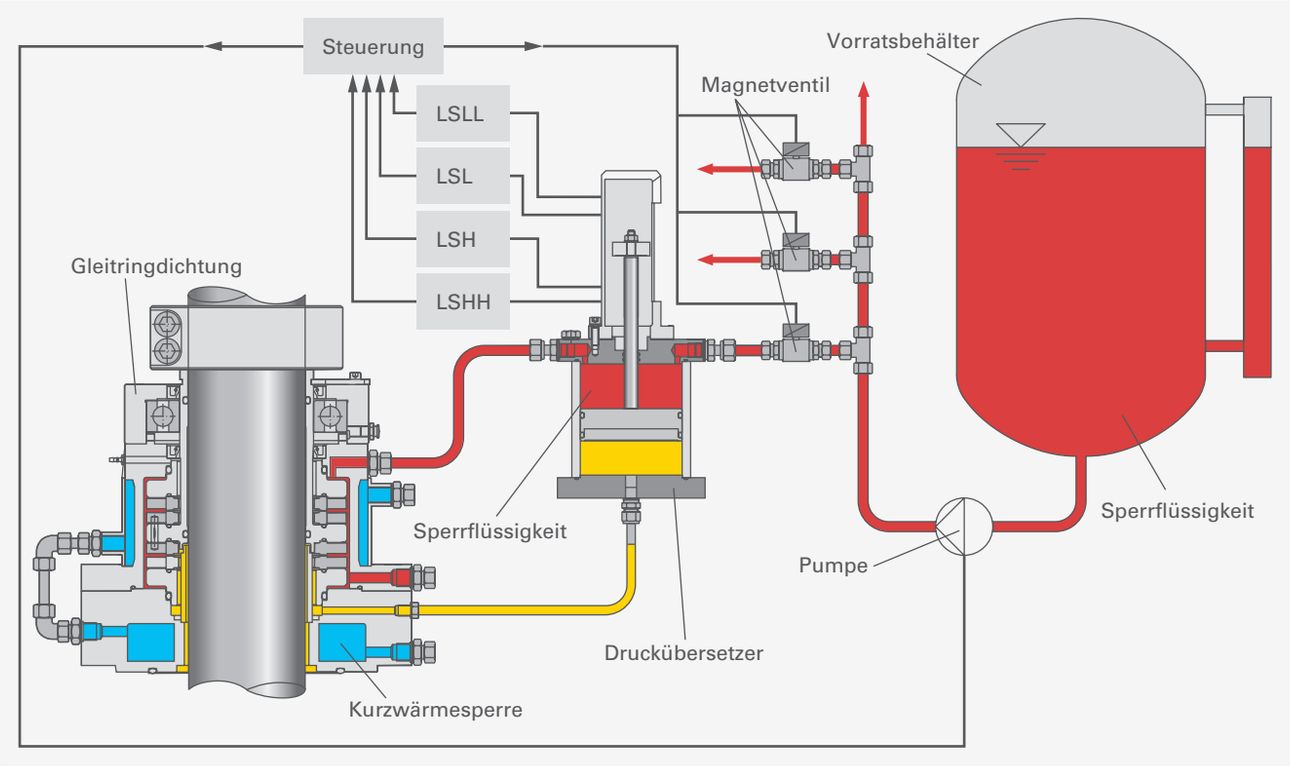


Abb. 157 Gleitringdichtungssystem

Etwas anders sieht die Situation bei den Prozessen und Anwendungen der Rührtechnik aus. Dort wird in der Regel erwartet, dass die Gleitringdichtung als Einheit eingesetzt und v. a. auch als solche ausgetauscht werden kann. Man spricht hierbei von „Cartridges“. Während man einfachwirkenden Gleitringdichtungen noch einen Komponentencharakter zusprechen kann, müssen doppelt- und dreifachwirkende Gleitringdichtungen aufgrund ihrer Komplexität als Gleitringdichtungssysteme bezeichnet werden.

Ein Gleitringdichtungssystem analog Abb. 157 besteht aus der Gleitringdichtungscartridge, der Hydraulikkomponente (z. B. Drückübersetzer) und der sogenannten „Installation“, welche die Verrohrung, Instrumentierung und Befestigung beinhaltet. Gegebenenfalls zählt dazu noch ein Sperrflüssigkeits-Nachfüllsystem wie exemplarisch in Abb. 157 dargestellt. Dies bedeutet, dass in der Rührtechnik gewöhnlich nur das gesamte Gleitringdichtungssystem eine zuverlässige Abdichtung des Rührbehälters sicherstellen kann. Eine sorgfältige Auswahl der passenden Hydraulik- und Installationskomponenten ist mindestens genau so wichtig wie die sichere Konstruktion der Gleitringdichtung selbst. Nur durch richtige Auswahl des Gleitringdichtungssystems kann eine sichere Abdichtung des Behälterinhalts erzielt und aufrechterhalten werden.

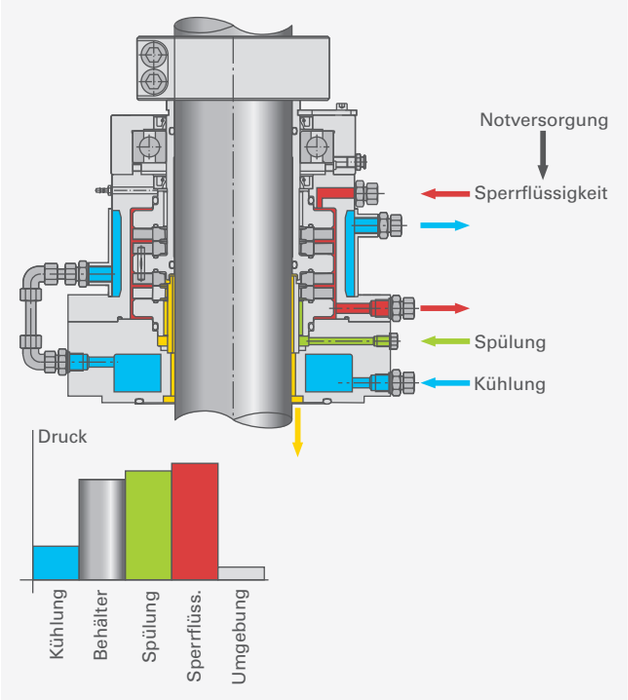


Abb. 158 Arten von Versorgungssystemen; oben: Schnittstellen an der Gleitringdichtung, unten: Drücke in den Systemkomponenten

Auch wenn die Grundoperationen der Verfahrenstechnik ausgereift erscheinen, stellen neue Produkte und Produktgruppen, neue Rohstoffbasen und Syntheserouten oder der Einbezug biologischer Prozesse den Chemieingenieur immer wieder vor Herausforderungen.

Massenchemikalien und -polymere auf Rohölbasis werden nach wie vor nach bewährten und weltweit lizenzierten Verfahren produziert. Moderne Rührtechnik optimiert hier die Herstellung und trägt zur Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit bei.

Die Biologie ergänzt die chemischen Methoden mehr und mehr. Klassische Fermenter mit Hochleistungsorganismen produzieren komplexe Moleküle. Die dabei erreichbaren hohen Stoffumsätze basieren auf effizientem Rühren. Der Abbau des Rohstoffs Biomasse zu chemischen Zwischenprodukten für neue Syntheserouten stellt eine völlig neue Technologie dar, die ohne die Rührtechnik nicht wirtschaftlich angewendet werden könnte.

Die Erzverarbeitung wird von umweltschädigenden Röstverfahren auf neue, hydrometallurgische Prozesse umgestellt. Diese werden durch Rührtechnik überhaupt erst möglich, sei es in der Drucklaugung oder durch Einbeziehen von Mikroorganismen zum Aufschluss der Erze.

Die volle Vielfalt rührtechnischer Lösungen spiegelt sich insbesondere in den Herstellungsverfahren für formulierte Handelswaren wider. Die Kombination klassischer Emulgiertechnik mit Hochdruckverfahren eröffnet neue Möglichkeiten in der sich dynamisch entwickelnden Welt der Nanopartikel. Die Trocknungstechnik mit dem zugehörigen Schüttguthandling wird dank neuer apparativer Konzepte vereinfacht. Dies schlägt sich auch in der Validierbarkeit der Produktionsergebnisse nieder, sofern nach den Grundsätzen der Good Manufacturing Practice produziert wird.

Die Prozesstechnik in ihrer heutigen Ausprägung ist ohne das Rühren nicht denkbar. Die Ekato Group leistet dazu mit ihren Neuentwicklungen und bewährten Lösungen einen maßgeblichen Beitrag.

DIE MASSGESCHNEIDERTE LÖSUNG

AUSGEFÜHRTE ANLAGEN

WORLD-SCALE-ANLAGEN
POLYMERE
HYDROMETALLURGIE
SPEZIALCHEMIKALIEN
TROCKNUNG
BIOTECHNOLOGIE
KRISTALLISATION
VISKOSE MEDIEN
SALBEN, CREMES
NANOMATERIALIEN
BIOETHANOL DER ZWEITEN GENERATION
GROSSBEHÄLTER, LAGERTANKS, SIDE ENTRYS

DIE MASSGESCHNEIDERTE LÖSUNG

AUSGEFÜHRTE ANLAGEN

WORLD-SCALE-ANLAGEN
POLYMERE
HYDROMETALLURGIE
SPEZIALCHEMIKALIEN
TROCKNUNG
BIOTECHNOLOGIE
KRISTALLISATION
VISKOSE MEDIEN
SALBEN, CREMES
NANOMATERIALIEN
BIOETHANOL DER ZWEITEN GENERATION
GROSSBEHÄLTER, LAGERTANKS, SIDE ENTRYS

Polymere sind organische Kettenmoleküle, deren jeweils gleichartige Grundbausteine Monomere genannt werden. Neben Standardpolymeren wie z. B. PVC (Polyvinylchlorid) oder PE (Polyethylen/Polyethen), gibt es Spezialkunststoffe, die für einen bestimmten Anwendungsfall maßgeschneidert sind. Zur Herstellung der Massenprodukte werden Anlagen mit Leistungen bis 500 000 t/a der hohen Durchsätze wegen meist kontinuierlich betrieben. Spezialitäten stellt man dagegen aufgrund häufiger Produktwechsel meist im Batchbetrieb her.

PROZESSTECHNISCHE FRAGESTELLUNGEN

Die Geschwindigkeit einer Polymerisationsreaktion kann über das Temperaturniveau nicht beliebig erhöht werden, da sich die Reaktions- und Endprodukte thermisch zersetzen. Die Reaktionszeiten betragen meist mehrere Stunden, sodass sich ein Strömungsrohr als Reaktor i. A. nicht eignet. Deshalb ist der Rührkessel nicht nur für den Batchbetrieb, sondern auch für kontinuierlich betriebene Anlagen der Reaktortyp der Wahl.

Je nach gewünschten Materialeigenschaften kann die Zahl der in einem Polymer verknüpften Moleküle mehrere Tausend betragen und die sich ergebenden Molekulargewichte können > 10 000 g/mol überschreiten.

Ein grundsätzliches Problem bei der Herstellung von Kunststoffen stellt die Ab- oder Zufuhr der Reaktionswärme dar. Zu Beginn der Polymerisation ist die Wärmeabfuhr einfach, da die zunächst gebildeten Oligomere mit ihrem geringen Polymerisationsgrad nur eine niedrige Viskosität besitzen.

Mit zunehmender Reaktionszeit kann die Viskosität der Polymere allerdings dramatisch ansteigen. Viskositäten um 1 000 000 mPa · s bei 300 °C sind keine Seltenheit. Bei diesen hohen Viskositäten treten Wärme- und Stofftransporthemmnisse zutage, deren Beherrschung für das gezielte Erreichen bestimmter Polymerqualitäten von entscheidender Bedeutung sind.

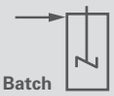
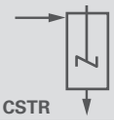
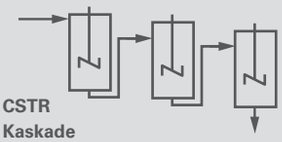
Polyreaktion / Reaktorschema	Masse-polymerisation	Polymerisation in Lösung	Suspensions-Polymerisation		Emulsions-polymerisation
			Fällungs-polymerisation	Perlpolymeri-sation	
 Batch Fed Batch	PVC PMMA Resins	SBR Resins Speciality Polymers	HDPE PTFE PPS	SAN PVC EPS PMMA Resins	PVC SAN PA ABS PTFE PVAc HIPS
 CSTR	LDPE PP PS SAN	HDPE	HDPE PP IIR		PVC
 CSTR Kaskade	HIPS ABS LDPE PET	BR IR EPDM	HDPE PP		SAN SBR CR NBR

Abb. 280 Zuordnung der wichtigsten Massenpolymere zu Polyreaktion und Fahrweise (CSTR: Continous Stirred Tank Reactor)

Zum einen kann die Reaktionswärme über die Behälterwand oder Wärmeaustauscher nicht ohne Weiteres abgeführt werden, da sich an den festen Wänden dicke Grenzschichten ausbilden, die einen erheblichen Wärmetransportwiderstand darstellen.

Zum anderen wird der Transport der Monomere zum Ort der Reaktion und der sekundären Reaktionsprodukte (z. B. Wasser bei der Polykondensation) vom Ort der Reaktion weg in der Regel behindert, sodass entweder eine örtliche Verarmung oder ein unerwünschter Überschuss von Komponenten zu lokalen Verschiebungen des chemischen Gleichgewichts führt. Um diese Schwierigkeiten zu überwinden, wurden reaktionstechnische Strategien entwickelt, von denen die wichtigsten hier kurz beschrieben werden.

Außer im eigentlichen Reaktor findet man in Polymerisationsanlagen üblicherweise noch zahlreiche weitere gerührte Prozessschritte. Diese dienen u. a. der Vorbereitung von Monomer und Katalysator, aber auch der Aufarbeitung des gebildeten Polymers nach der Reaktion, beispielsweise der Entfernung von Lösungsmittel oder Restmonomer, wie am Ende dieses Abschnitts näher ausgeführt.

MASSEPOLYMERISATION

Bei der Massepolymerisation wird vom reinen Monomer ausgegangen und ohne zusätzliche Lösungsmittel gearbeitet. Dies führt bei hohen Umsätzen natürlich zu entsprechend hohen Viskositäten im Reaktor. Diese werden durch Wärmezufuhr, d. h. Temperaturerhöhung so weit gesenkt, dass sich das Medium (gerade) noch umwälzen lässt. Der Einbau von Kühlelementen in den Reaktor verbietet sich meist, da es an den Einbauten zu Anbackungen kommen würde.

HAUPTRÜHRAUFGABEN

- Gesamtumwälzung einer hochviskosen Polymerschmelze
- Erreichen einer hohen Temperaturhomogenität

HOMOGENE LÖSUNGSMITTEL-POLYMERISATION

Bei der homogenen Lösungsmittel-Polymerisation wird die Viskosität durch Zugabe eines chemisch inerten Lösungsmittels abgesenkt. Sowohl das Monomer als auch das Polymer liegen über die gesamte Prozessdauer hinweg in gelöster Form vor. Oft wird zur Verbesserung der Wärmeabfuhr gleichzeitig das Sieden des Lösungsmittels zur Kühlung ausgenutzt.

HAUPTRÜHRAUFGABE

- zügiger Axialaustausch zum Erreichen isothermer Bedingungen

EMULSIONSPOLYMERISATION

Bei der Emulsionspolymerisation wird das nicht wasserlösliche Monomer als organische Phase in einer wässrigen Phase vordispergiert. Die Dispersion wird im Gegensatz zur Perlpolymerisation nicht physikalisch durch Turbulenz, sondern chemisch mithilfe von Emulgatoren stabilisiert. Die Polymerisation findet nicht in den dispergierten Monomertröpfchen, deren Durchmesser 10–500 µm betragen, sondern in wesentlich kleineren Latexteilchen mit Durchmessern um 0,3–0,8 µm statt. Diese enthalten sowohl Polymermoleküle als auch Monomere und sind zur Stabilisierung gegen die wässrige Phase von Emulgatoren umgeben. Wegen der geringen Teilchengröße kann die Reaktionswärme leicht an die wässrige Phase abgegeben werden. Der Wärmeübergang zwischen der Behälterwand und der wässrigen Phase ist wegen der niedrigen Viskosität der Emulsion und wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit von Wasser sehr gut.

HAUPTRÜHRAUFGABEN

- minimale Scherung
- möglichst geringer Leistungseintrag zur Verhinderung von Koagulation
- guter Wärmeübergang

SUSPENSIONSPOLYMERISATION

Man unterscheidet bei der Suspensionspolymerisation zwei Fälle:

- Bei der Perlpolymerisation sind weder das Polymer noch das Monomer in der Trägerflüssigkeit löslich, sodass die Polymerisation innnerhalb von Monomertröpfchen (Durchmesser 10–1000 µm) erfolgt.
- Bei der Fällungspolymerisation liegt das Monomer in der Trägerflüssigkeit gelöst vor, während das Polymer darin nicht löslich ist. Daher fällt bei der Polymerisation das Polymer in Form von Primärpartikeln mit ca. 1 µm Durchmesser aus, die zu porösen Partikeln von 100–200 µm Durchmesser agglomerieren. Die Feststoffteilchen neigen in bestimmten Phasen der

Polymerisation zum Verkleben (Koagulation) und müssen deshalb durch Scherung im Strömungsfeld wieder voneinander getrennt (dispergiert) werden.

1. PERLPOLYMERISATION

Bei der Perlpolymerisation wird das wasserunlösliche Monomer in einer wässrigen Phase dispergiert. Die Monomertröpfchen bilden sich im Scherfeld des Rührers und werden mithilfe von Schutzkolloiden stabilisiert. Da sie nach der Dispergierung ihre Identität behalten, spricht man in diesem Fall von einer turbulenzstabilisierten Dispersion.

HAUPTRÜHRAUFGABEN

- ausreichend hohe lokale Energiedissipation der Rührorgane, bei gleichzeitigem gutem Axialaustausch zur Erreichung enger Korngrößenverteilungen,
- Beherrschung der Wärmeabfuhr,
- guter Oberflächeneinzug speziell bei Rückflusskühlung.

2. FÄLLUNGSPOLYMERISATION

Bei der Fällungspolymerisation liegen die Ausgangssubstanzen in einer homogenen (organischen) Mischung vor. Nach Zugabe eines Initiators fallen die sich bildenden, in der die gelösten Monomere enthaltenden Trägerflüssigkeit unlöslichen Polymere aus der kontinuierlichen Phase als Primärteilchen mit Durchmessern von oft unter 1 µm aus.

Ist das Polymer ebenfalls löslich, so wird das Monomer meist durch große Mengen von im Monomer löslichem Fällungsmittel verdünnt und so die Ausfällung des Polymers erreicht. Die Primärteilchen agglomerieren zu Sekundärpartikeln, in Abhängigkeit von der durch Rühren eingebrachten Scherung.

HAUPTRÜHRAUFGABEN

- Dispergierung des zugeführten Monomeres,
- hohe Wandgeschwindigkeiten zur Vermeidung von Wandbelägen,
- Wärmeabfuhr.

Alle Polymerisationsverfahren haben Vor- und Nachteile, die bei den einzelnen Reaktionssystemen unterschiedlich stark zur Geltung kommen. So können z. B. bei Masse- und Lösungsmittelpolymerisationen die Reaktionsprodukte direkt weiterverarbeitet werden. Bei den anderen Verfahren sind hingegen mehr oder weniger aufwendige Aufbereitungsschritte (Filtration, Zentrifugieren, Trocknung etc.) notwendig, sofern die entstandenen Emulsionen oder Suspensionen (Dispersionen) sich nicht direkt weiterverarbeiten lassen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Polymerisationsmethoden unter rührtechnischen Gesichtspunkten anhand typischer Produkte beschrieben.

ANWENDUNGSBEISPIELE

MASSEPOLYMERISATION – HERSTELLUNG VON HIPS

Anlagen zur Herstellung von hochschlagfestem Polystyrol (High Impact Resistant PolyStyrene, HIPS) bestehen üblicherweise aus einer Kaskade von 3–5 Reaktoren, aufgeteilt in eine Vorpolymerisations- und eine Nachpolymerisationssektion. Bei der Vorpolymerisation wird die angestrebte Morphologie und Partikelgröße bereits größtenteils eingestellt. Die Reaktion wird üblicherweise bei 100–150 °C bis zu 15–30 % Umsatz durchgeführt. In der Nachpolymerisation wird dann bei entsprechend hoher Viskosität zu hohen Umsätzen weiter polymerisiert. Üblicherweise findet die Nachpolymerisation bei Temperaturen von 140–190 °C statt.

In der Reaktorkaskade wird die Polymerisationswärme durch Verdampfen des Styrolmonomers abgeführt, das gasförmige Monomer wird an großflächigen Kondensatoren wieder verflüssigt und zurück in den Reaktor geleitet. Die Voraussetzung für diese Art der Wärmeabfuhr sind eine gute Durchmischung und ein guter Oberflächeneinzug. Aus diesem Grunde wird in diesen Reaktoren gern der Ekato Paravisc (Abb. 281) verwendet.

Die Temperaturhomogenität ist die zentrale Einflussgröße für die Molmassenverteilung und damit die erreichbare Produktqualität. Die Temperatur selbst wird bei dieser Art der Rückflusskühlung durch Regelung des Druckes und damit durch die Verschiebung der Siedetemperatur des Styrols eingestellt.

LÖSUNGSMITTELPOLYMERISATION – HERSTELLUNG VON POLYBUTADIEN

Polybutadien (Butyl-Rubber) wird als synthetischer Kautschuk vor allem für die Laufflächen von Autoreifen eingesetzt. Es wird nahezu ausschließlich auf dem Wege der Lösungspolymerisation unter Verwendung von Ziegler-Natta-Katalysatoren hergestellt. Dabei findet häufig Toluol als Lösungsmittel Verwendung.

Im Bereich der Reaktion gibt es lediglich die rührtechnischen Anforderungen einer guten Homogenisierung und Axialförderung zum schnellen Ausgleich von Konzentrations- und Temperaturgradienten.

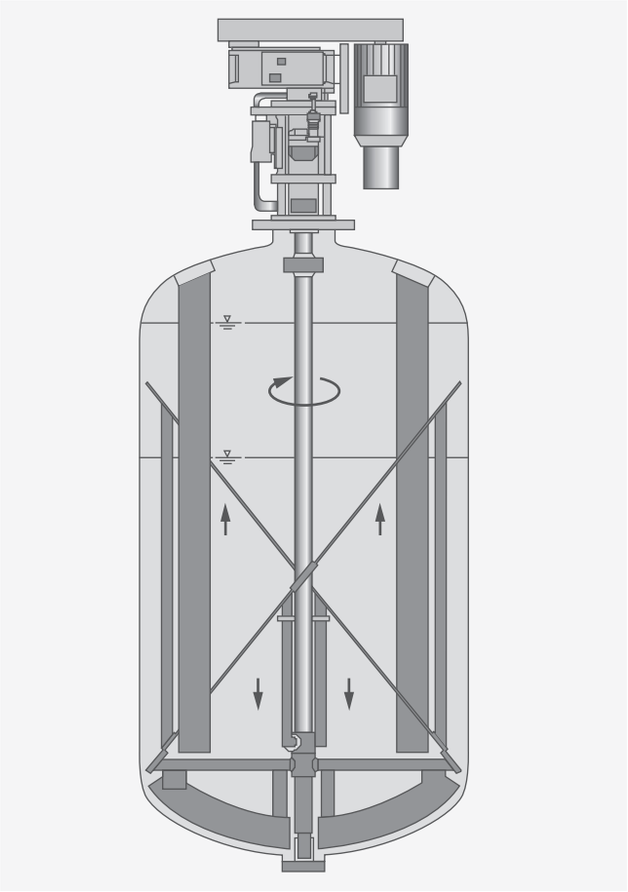


Abb. 281 HIPS-Reaktor mit Ekato Paravisc

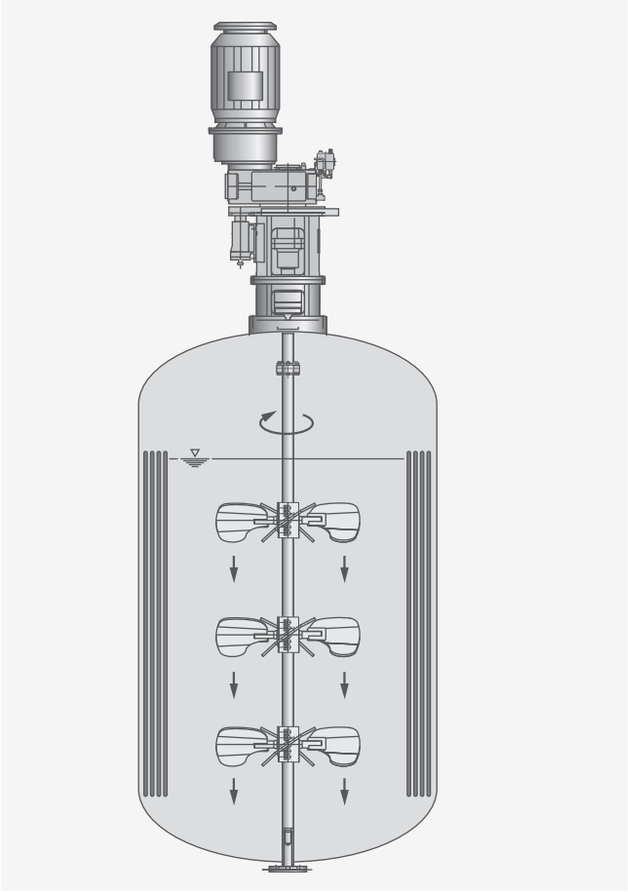


Abb. 282 Herstellung von ABS unter Einsatz eines dreistufigen Ekato Isojet B für die Emulsionspolymerisation von PBL

EMULSIONSPOLYMERISATION AM BEISPIEL ABS

Die Synthese von ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer) läuft üblicherweise in zwei Schritten ab. Zunächst wird, ausgehend von monomerem Butadien, via Emulsionspolymerisation eine Polybutadiendispersion (Polybutadienlatex, PBL) hergestellt. Diese wird anschließend mit dem Copolymer Styrol-Acrylnitril (SAN) in Emulsion weiterverarbeitet und schließlich auf die gewünschte Kautschukkonzentration eingestellt.

Vor der Weiterverarbeitung mit Styrol-Acrylnitril ist es wichtig, die PBL-Dispersion auf die gewünschte Teilchengröße zu bringen. Größere Teilchen liefern im Endprodukt bessere Schlagzähigkeit, aber geringeren Oberflächenglanz. Der optimale Größenbereich der PBL-Teilchen liegt bei ca. 0,3–0,5 µm.

Im Reaktor werden Latexpartikel im Scherfeld des Rührers umso stärker beansprucht, je größer die Teilchen sind. Wird die Emulgatorhülle zweier benachbarter Teilchen durch die hohe lokale Scherung eines ungeeigneten Rührsystems zerstört, so koagulieren diese zu noch größeren Latexpartikeln. Dies verändert die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts signifikant. Außerdem bilden sich dann stärkere Wandbeläge, welche die Abfuhr der Reaktionswärme hemmen. Kurze Reinigungszyklen mit erheblichen Produktivitätsverlusten sind die Folge.

Ein ideales Rührsystem für diese Anwendung stellt der Ekato Isojet B dar. Eine mehrstufige Ausführung dieses sehr scherarmen Rührorgans wird im PBL-Reaktor vorteilhaft verwendet (Abb. 282). Gleichzeitig kann durch die Ausführung der Stromstörer als zusätzliche Wärmetauscher eine sehr effektive Kühlung erreicht werden.

PERLPOLYMERISATION AN BEISPIEL PVC

Einige der bedeutendsten Polymere wie PVC, EPS oder PMMA werden mithilfe der Perlpolymerisation hergestellt. Charakteristisch für die Perlpolymerisation ist zunächst, dass das Monomer bei Polymerisationsbeginn in unlöslicher Form vorliegt. Die Monomertröpfchen sind während

der Reaktion bildlich gesprochen als lauter „kleine, wassergekühlte Reaktoren“ in der wässrigen Phase dispergiert.

Zentrale Parameter für die Produktqualität sind bei der Perlpolymerisation die Partikelgrößenverteilung sowie häufig auch die Porosität des Endprodukts – Idealziel ist vollständig monodisperses Material. Generell kann man konstatieren: Je enger die Partikelgrößenverteilung im gewünschten Zielgebiet ist, umso lukrativer lässt sich das Material vermarkten.

Diese Zielsetzung ist mit hohen Anforderungen an das Rührsystem verbunden:

- zunächst ist das Monomer zur Bildung möglichst gleichförmig in Wasser zu dispergieren (enge Tropfengrößenverteilung),
- das Material soll im großen Maßstab über den gesamten Kessel möglichst homogen erzeugt werden (kleine Temperatur- und Konzentrationsgradienten),
- dementsprechend ist auch die Bildung einer separaten Monomerphase an der Oberfläche zu vermeiden (Pooling),
- die entstehenden Polymerperlen sind homogen zu suspendieren,
- die Reaktionswärme ist – sofern nicht über Verdampfungskühlung und entsprechende Kondensatoren abführbar – über die Behälterwand auszuleiten.

Herkömmlicherweise sind bei der Perlpolymerisation einfache, meist einstufig radial fördernde Impeller-Rührorgane im Einsatz. Insbesondere in schlanken Behältern ist deren Mischwirkung im oberen Bereich begrenzt. Im folgenden werden die Vorteile des Ekato-Viscoprop-Rührsystems gegenüber diesen traditionellen Rührsystemen diskutiert.

Betrachtet man die Bahnen einzelner Volumenelemente – in diesem Fall Monomertröpfchen – auf dem Weg von der Flüssigkeitsoberfläche in den Polymerisationskessel hinein, dann zeigt sich, dass beim Impeller infolge starker Rotation sehr viel mehr Zeit bis zum Einzug des Monomertropfens vergeht als beim axial fördernden Viscoprop-Rührorgan.

In Abb. 283 sind mit CFD berechnete Strömungsgeschwindigkeiten beim Viscoprop-System dargestellt. In der Nähe der Rührwelle und in der Umgebung der Rührorgane erkennt man sehr gut schnelle, axial nach unten gerichtete Strömungen. Dies wird durch die optimale Ausformung der Viscoprop-Rührorgane und die Anpassung des Rührsystems inklusive Stromstörern an den Reaktionsbehälter erreicht. In der Nähe der Reaktorwand

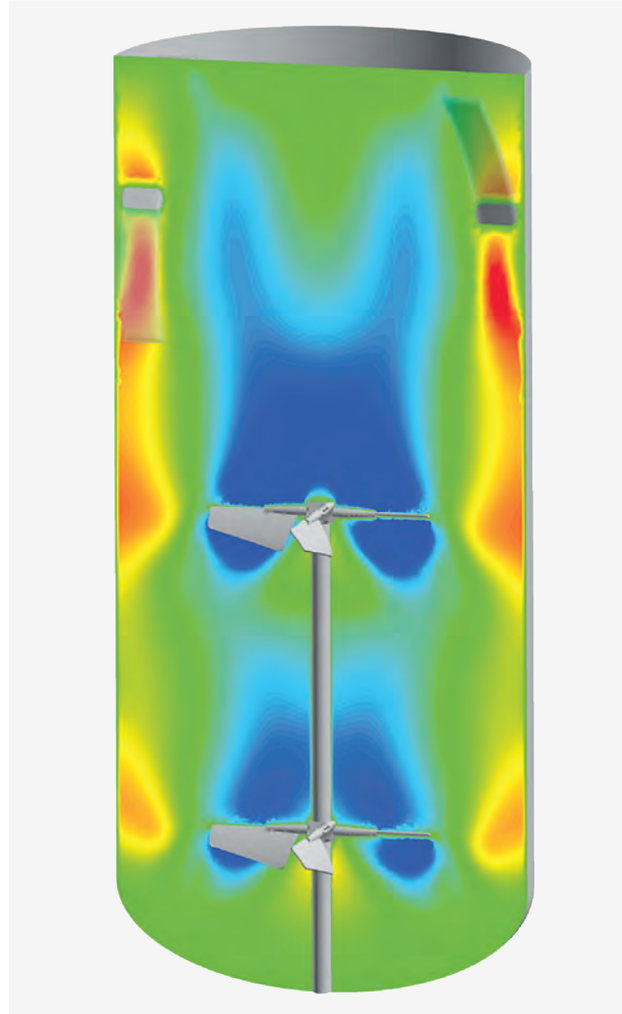


Abb. 283 Mit CFD berechnete Axialgeschwindigkeiten im PVC- Reaktor

bildet sich ein entsprechend nach oben gerichtetes Strömungsprofil aus, das für hohe Wandgeschwindigkeiten sorgt. Der Gefahr von Ablagerungen wird vorgebeugt, da der Reaktor trotz seiner Größe und seiner schlanken Bauweise keine Totzonen aufweist.

EINFLUSS AUF DIE PARTIKELGRÖSSENVERTEILUNG

Nach der Optimierung der Polymerisation mit dem neuen Ekato-Rührsystem konnten deutlich engere Partikelgrößenverteilungen erzielt werden. Dies ist eine direkte Folge des axial fördernden, mehrstufigen Systems. Wie Abb. 284 schematisch zeigt, besteht bei herkömmlichen, radial fördernden Systemen die Gefahr, dass sich durch Koagulation von Tröpfchen in rührerfernen Zonen die Kornverteilung extrem verbreitert. Bei herkömmlichen Rührsystemen kann es sogar dazu kommen, dass bimodale Partikelgrößenverteilungen auftreten.

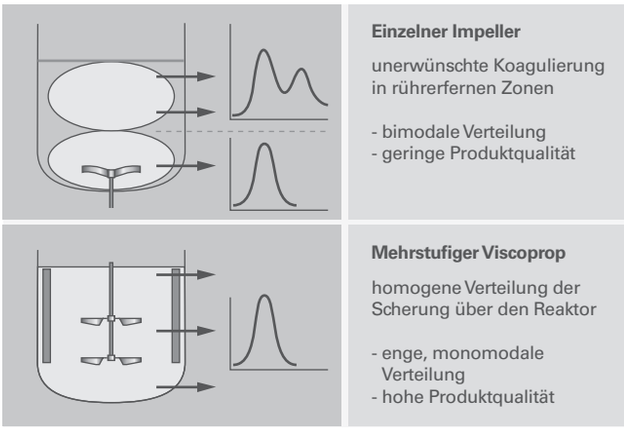


Abb. 284 Einfluss eines einstufig radial fördernden (oben) und eines mehrstufigen, axial fördernden Rührsystems (unten) auf die Partikelgrößenverteilung bei der Perlpolymerisation

Mit der dargestellten Ekato-Lösung erreicht man nach Abstimmung des Polymerisationsverfahrens auf das neue Rührsystem eine enge Verteilung um die Zielpartikelgröße. In Pilotversuchen, die bereits im 100- bis 500-l-Maßstab repräsentative Ergebnisse liefern, lassen sich durch Variation von Rührsystem, Art und Menge des Schutzkolloids und Leistungseintrag bereits schnell deutliche Verbesserungen realisieren und in den Betriebsmaßstab übertragen.

FÄLLUNGSPOLYMERISATION VON HDPE

Die Fällungspolymerisation von HDPE (High Density Polyethylen/Polyethen) erfolgt bei niedrigem Druck in Autoklaven. Zur Produktion von unimodalem HDPE werden die Reaktoren parallel betrieben, für bimodales HDPE in Serie (Kaskade).

Derzeitige Reaktorgrößen sind im Bereich von bis zu 300 m^3 zu finden mit Kapazitäten von bis zu 500 kt/a. Der Katalysator wird chargenweise in einem Behälter angesetzt, in einem weiteren werden die verschiedenen Ansätze verdünnt und über eine Dosierung dem Reaktor zugeführt. Dem kontinuierlichen Reaktor werden außerdem Monomer, Wasserstoff und Hexan zugeführt. Die exotherme Reaktion läuft bei einem Druck von 5–10 bar und einer Temperatur von 75–85 °C ab. Die Wärme wird in einem außenliegenden Wärmetauscher abgeführt. Das Molekulargewicht, die Molekulargewichtsverteilung und die Dichte des Produkts werden über die Art und Konzentration von Katalysator und Comonomer sowie die Menge des Wasserstoffs eingestellt. Die Reaktoren können sowohl in Serie als auch parallel betrieben werden.

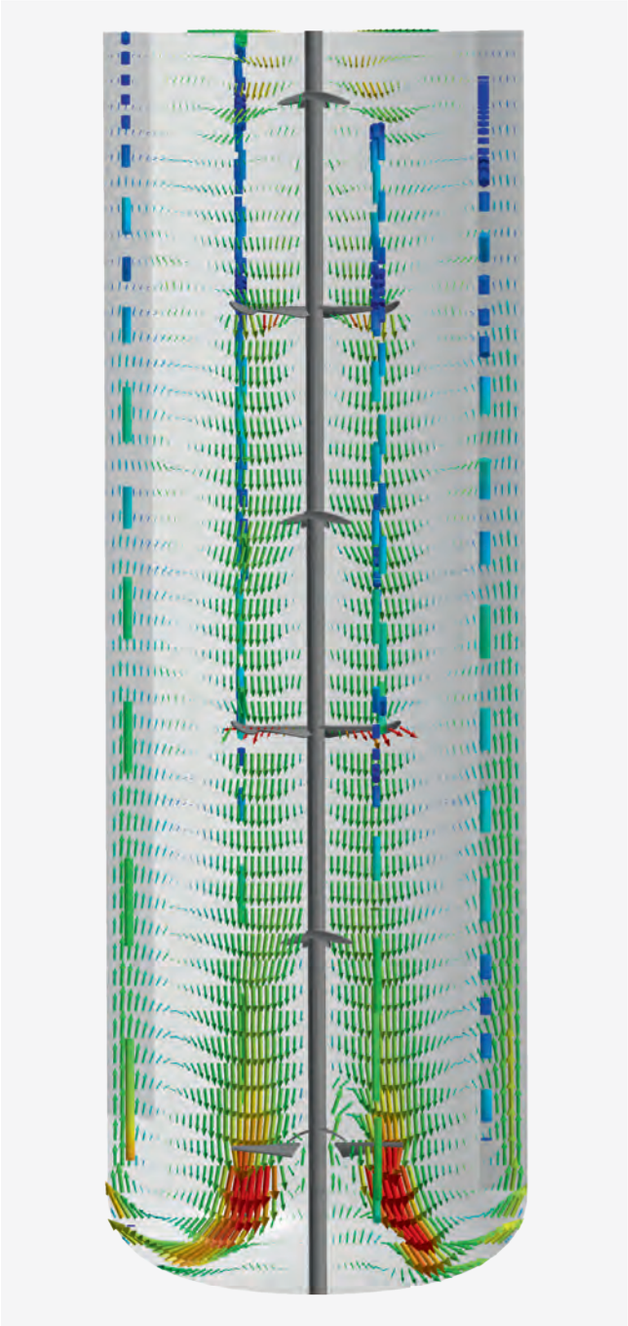


Abb. 285 HDPE-Reaktor mit Ekato Isojet VDT

Am Ende der Kette steht der Nachreaktor, wo das Monomer bis zu einem Umsatz von 99 % gefahren wird. Die Suspension wird sodann in den „Receiver“ gefördert, zentrifugiert, in einem Wirbelbett mit heißem Stickstoff getrocknet und anschließend gesiebt. Vor der nachfolgenden Extrusion werden Stabilisatoren und Additive zugemischt.

ISBN 978-3-00-037510-1