

Systeme  
für die technische  
Ausbildung

Prozess-  
technik



# Inhalt

## Willkommen bei GUNT

Im vorliegenden Katalog geben wir Ihnen einen umfassenden Überblick über unsere innovativen Demonstrations- und Versuchsgeräte.

GUNT-Geräte für:

- Ausbildung in technischen Berufen
- Training und Weiterbildung von technischem Personal in Handwerk und Industrie
- Studium der Ingenieurdisziplinen

## Prozesstechnik

	Einleitung	004
1	Mechanische Verfahrenstechnik	006
2	Thermische Verfahrenstechnik	084
3	Chemische Verfahrenstechnik	134
4	Biologische Verfahrenstechnik	170
5	Pilotanlagen	202
	Produktübersicht	222

### Impressum

© 2024 by GUNT Gerätebau GmbH, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung gestattet. GUNT und 2E sind eingetragene Marken. Unsere Produkte sind somit geschützt und unterliegen dem Urheberrecht.

Für Druckfehler kann keine Gewähr übernommen werden. Änderungen vorbehalten.

Bildnachweise: GUNT Gerätebau GmbH, Herstellerfotos, Shutterstock, 123RF  
 Gestaltung & Satz: Profisatz.Graphics, Hamburg  
 Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem, umweltfreundlichen Papier.

# Ausbildung in der Prozesstechnik mit GUNT-Ausbildungssystemen

## Kernbereiche der Prozesstechnik (Verfahrenstechnik)

Gegenstand der Prozesstechnik (Verfahrenstechnik) sind Vorgänge, bei denen Stoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung oder Eigenschaft verändert werden. Derartige Prozesse werden beispielsweise in folgenden Industriebereichen angewendet:

- chemische Industrie
- Nahrungsmittelindustrie
- Textilindustrie
- petrochemische Industrie
- Umwelttechnik

Für das Verständnis der komplexen prozesstechnischen Zusammenhänge ist eine systematische Ausbildung angehender Ingenieure und Facharbeiter unerlässlich. Historisch hat sich in der Prozesstechnik daher die nachfolgende Einteilung der einzelnen Grundverfahren in vier Kernbereiche entwickelt und etabliert. Diese Einteilung orientiert sich an der Art der Einwirkung, die bei dem jeweiligen Grundverfahren wirkt.

<b>Mechanische Verfahrenstechnik</b>	Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik sind die Veränderungen von Stoffeigenschaften (z.B. Partikelgröße) und Stoffzusammensetzungen (Konzentration) durch mechanische Einwirkungen.
<b>Thermische Verfahrenstechnik</b>	Im Fokus der Thermischen Verfahrenstechnik stehen thermische Trennprozesse. In Stoffgemischen aus mindestens zwei Komponenten wird durch Wärme- und Stofftransportprozesse die Zusammensetzung eines Gemisches gezielt verändert.
<b>Chemische Verfahrenstechnik</b>	In der Chemischen Verfahrenstechnik steht nicht die Änderung von Stoffeigenschaften oder Stoffzusammensetzungen im Vordergrund. Zentraler Gegenstand der Chemischen Verfahrenstechnik ist vielmehr die Erzeugung einer neuen Stoffart durch chemische Reaktionen.
<b>Biologische Verfahrenstechnik</b>	In der Biologischen Verfahrenstechnik erfolgen Stoffumwandlungen durch biologisch aktive Organismen, wie z.B. Bakterien, Pilze, Algen, Zellen und Enzyme. Ziel der Biologischen Verfahrenstechnik ist es, für diese Organismen die optimalen Bedingungen bereitzustellen.

Teil des Produktbereiches Energy & Environment GUNT-Software, digitale Datenerfassung, Versuchsauswertung



## Aufbau des Kataloges

Die Struktur dieses Kataloges folgt der klassischen Einteilung der Prozesstechnik (Verfahrenstechnik) in die vier Kernbereiche. Die einzelnen Grundverfahren basieren auf mechanischen, thermischen, chemischen und biologischen Gesetzmäßigkeiten bzw. Erfahrungen. Zusätzlich finden Sie in Kapitel 5 verschiedene prozesstechnische Anlagen im Pilotmaßstab.

Ein Grundverfahren ist die kleinste gedanklich definierte Einheit eines Gesamtprozesses. Die Beschränkung auf diese kleinen Einheiten ist in der Forschung und Ausbildung sinnvoll, da aufgrund mehrerer beteiligter Phasen (fest, flüssig, gasförmig) und Stoffe bereits auf Ebene der Grundverfahren komplexe Aufgabenstellungen zu bewältigen sind.

	<b>Mechanische Verfahrenstechnik</b>	<b>Trennverfahren</b>
		▶ Klassieren
		▶ Sortieren
		▶ Trennung im Schwerkraftfeld
		▶ Trennung im Fliehkraftfeld
		▶ Filtration
		<b>Zerkleinerung</b>
		<b>Mischen</b>
		<b>Agglomeration</b>
		<b>Lagern und Fließen von Schüttgütern</b>
		<b>Wirbelschichten und Pneumatische Förderung</b>
	<b>Thermische Verfahrenstechnik</b>	<b>Trocknung</b>
		<b>Verdampfung</b>
		<b>Destillation und Rektifikation</b>
		<b>Absorption</b>
		<b>Adsorption</b>
		<b>Kristallisation</b>
		<b>Membrantrennverfahren</b>
		<b>Extraktion</b>
		<b>Stoffübertragung</b>
		<b>Thermische Aktivierung</b>
<b>Katalytische Aktivierung</b>		
		<b>Fotochemische Aktivierung</b>
	<b>Biologische Verfahrenstechnik</b>	<b>Aerobe Verfahren</b>
		<b>Anaerobe Verfahren</b>
	<b>Pilotanlagen</b>	<b>Prozesstechnische Anlagen im Pilotmaßstab</b>



# Mechanische Verfahrenstechnik

## Grundverfahren der Mechanischen Verfahrenstechnik im Versuch erarbeiten

GUNT bietet Ihnen das komplette Geräte-Programm zur Erarbeitung der Grundverfahren im Bereich der Mechanischen Verfahrenstechnik.

### Bitte beachten Sie:

Ihre Laborräume müssen für den Betrieb der Geräte geeignet sein. Abhängig vom jeweiligen Prozess und den eingesetzten Stoffen sind versiegelte Böden, Abflüsse, eine Wasser- bzw. Druckluftversorgung, Lüftungen, spezielle Fundamente, sichere Lagereinrichtungen für die eingesetzten Stoffe etc. erforderlich.

Zur Auswertung vieler Versuche benötigen Sie – über den Lieferumfang der GUNT-Lehrsysteme hinausgehend – Systeme für die professionelle Analysetechnik.

Sprechen Sie mit uns – wir beraten Sie gern.

Einführung	
<b>Übersicht</b> Die GUNT-Lernkonzepte zur Mechanischen Verfahrenstechnik	008

### Trennverfahren: Klassieren und Sortieren

<b>Basiswissen</b> Klassieren	010
<b>Basiswissen</b> Sortieren	011
<b>Übersicht</b> CE 275 Windsichtung	012
<b>CE 275</b> Windsichtung	014
<b>CE 264</b> Siebmaschine	016
<b>Übersicht</b> MT174 Sortieranlage	017
<b>CE 280</b> Magnetscheidung	018

### Trennverfahren: Trennung im Schwerkraftfeld

<b>Basiswissen</b> Sedimentation	020
<b>Basiswissen</b> Flotation	021
<b>CE 115</b> Grundlagen der Sedimentation	023
<b>Übersicht</b> HM142 Sedimentation in Absetzbecken	024
<b>HM 142</b> Sedimentation in Absetzbecken	026
<b>Übersicht</b> CE587 Druckentspannungsflotation	028
<b>CE 587</b> Druckentspannungsflotation	030
<b>CE 588</b> Demonstration der Druckentspannungsflotation	032

### Trennverfahren: Trennung im Fliehkraftfeld

<b>Basiswissen</b> Trennung im Fliehkraftfeld	035
<b>CE 282</b> Tellerzentrifuge	036
<b>CE 235</b> Gaszyklon	038
<b>CE 225</b> Hydrozyklon	040

### Trennverfahren: Filtration

<b>Basiswissen</b> Filtration	042
<b>CE 116</b> Kuchen- und Tiefenfiltration	043
<b>CE 117</b> Durchströmung von Partikelschichten	044
<b>CE 287</b> Rahmenfilterpresse	046
<b>CE 283</b> Trommelzellenfilter	048
<b>CE 284</b> Saugnutsche	050
<b>CE 286</b> Drucknutsche	051
<b>CE 285</b> Suspensionsbereiter	052
<b>Übersicht</b> CE579 Tiefenfiltration	054
<b>CE 579</b> Tiefenfiltration	056

### Zerkleinerung

<b>Basiswissen</b> Zerkleinerung	058
<b>CE 245</b> Kugelmühle	059

### Mischen und Agglomeration

<b>Basiswissen</b> Mischen	060
<b>Basiswissen</b> Agglomeration	061
<b>CE 320</b> Rühren	062
<b>Übersicht</b> CE322 Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters	064
<b>CE322</b> Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters	066
<b>CE 255</b> Rollagglomeration	068

### Lagern und Fließen von Schüttgütern

<b>Basiswissen</b> Lagern und Fließen von Schüttgütern	070
<b>CE 210</b> Ausfließen von Schüttgut aus Silos	072
<b>CE 200</b> Fließeigenschaften von Schüttgütern	074

### Wirbelschichten und Pneumatische Förderung

<b>Basiswissen</b> Wirbelschichten	076
<b>Basiswissen</b> Pneumatische Förderung	077
<b>CE 220</b> Wirbelschichtbildung	078
<b>CE222</b> Vergleich von Wirbelschichten	080
<b>CE 250</b> Pneumatische Förderung	082

# Die GUNT-Lernkonzepte zur Mechanischen Verfahrenstechnik

## Womit beschäftigt sich die Mechanische Verfahrenstechnik?

Verfahrenstechnik ist die Ingenieurwissenschaft der Stoffumwandlung.

Gegenstand der Mechanischen Verfahrenstechnik sind die Veränderungen von Stoffeigenschaften (z.B. Partikelgröße) und Stoffzusammensetzungen (Konzentration) durch mechanische Einwirkungen.

Die mechanischen Einwirkungen sind Kräfte, die auf die Stoffe ausgeübt werden. Es kann sich dabei z.B. um Druckkräfte, Reibungskräfte, Impulse und durch Strömungswiderstände ausgelöste Kräfte handeln.

Die Stoffsysteme, mit denen sich die Mechanische Verfahrenstechnik beschäftigt, werden als disperse Systeme bezeichnet. Sie bestehen aus mindestens einer dispersen Phase und einer kontinuierlichen Phase. Die disperse Phase setzt sich meist aus vielen Einzelpartikeln zusammen, die in der kontinuierlichen Phase fein verteilt (dispers) vorliegen. Bei der dispersen Phase handelt es sich größtenteils um Feststoffe. Beide Phasen können aber ebenso flüssig oder gasförmig sein. Beispiele für disperse Systeme sind Schüttgüter wie Sand, erzhaltiges Gestein, Suspensionen, Emulsionen und Stäube.

## Wie lassen sich die Grundverfahren der Mechanischen Verfahrenstechnik einteilen?

Grundverfahren der Mechanischen Verfahrenstechnik		
mit Änderung der Partikelgröße	ohne Änderung der Partikelgröße	
Zerkleinerung	Trennverfahren	Mischen
Agglomeration	Lagern und Fließen von Schüttgütern	Wirbelschichten und Pneumatische Förderung

Grundsätzlich lassen sich die Verfahren in zwei Hauptgruppen einteilen. Bei der Zerkleinerung und der Agglomeration (Kornvergrößerung) wird gezielt die Größe von Feststoffpartikeln verändert. Beim Trennen, Mischen, der Lagerung und Förderung von Schüttgütern bleibt die Partikelgröße in der Regel unverändert. Mit den Trennverfahren erfolgt in vielen Fällen die Abscheidung von festen, dispersen Phasen aus Fluiden und die Trennung von Feststoffgemischen in Fraktionen mit unterschiedlichen Partikeleigenschaften.

In Wirbelschichten können je nach Anwendung Misch-, Trenn- oder Agglomerationsprozesse stattfinden.

Prof. Gorzitzke hat uns beim Aufbau dieses Programms beraten und dabei seine langjährige Lehr- erfahrung im Bereich der Mechanischen Verfahrenstechnik eingebracht.



Prof. Dr. Wolfgang Gorzitzke (Hochschule Anhalt), unser technischer Berater für die Mechanische Verfahrenstechnik

## Unsere Lehrsysteme für die Mechanische Verfahrenstechnik

Zerkleinerung	CE 245 Kugelmühle
Agglomeration	CE 255 Rollagglomeration
Trennverfahren	Klassieren CE 275 Windsichtung CE 264 Siebmaschine
	Sortieren CE 280 Magnetscheidung
	Trennung im Schwerkraftfeld CE 115 Grundlagen der Sedimentation HM142 Sedimentation in Absetzbecken CE 587 Druckentspannungsflotation CE 588 Demonstration der Druckentspannungsflotation
	Trennung im Fliehkraftfeld CE 282 Tellerzentrifuge CE 235 Gaszyklon CE 225 Hydrozyklon
	Filtration CE 116 Kuchen- und Tiefenfiltration CE 117 Durchströmung von Partikelschichten CE 287 Rahmenfilterpresse CE 283 Trommelzellenfilter CE 284 Saugnutsche CE 286 Drucknutsche CE 579 Tiefenfiltration
Mischen	CE 320 Rühren CE 322 Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters
Lagern und Fließen von Schüttgütern	CE 210 Ausfließen von Schüttgut aus Silos CE 200 Fließeigenschaften von Schüttgütern
Wirbelschichten und Pneumatische Förderung	CE 220 Wirbelschichtbildung CE 222 Vergleich von Wirbelschichten CE 250 Pneumatische Förderung

## Basiswissen

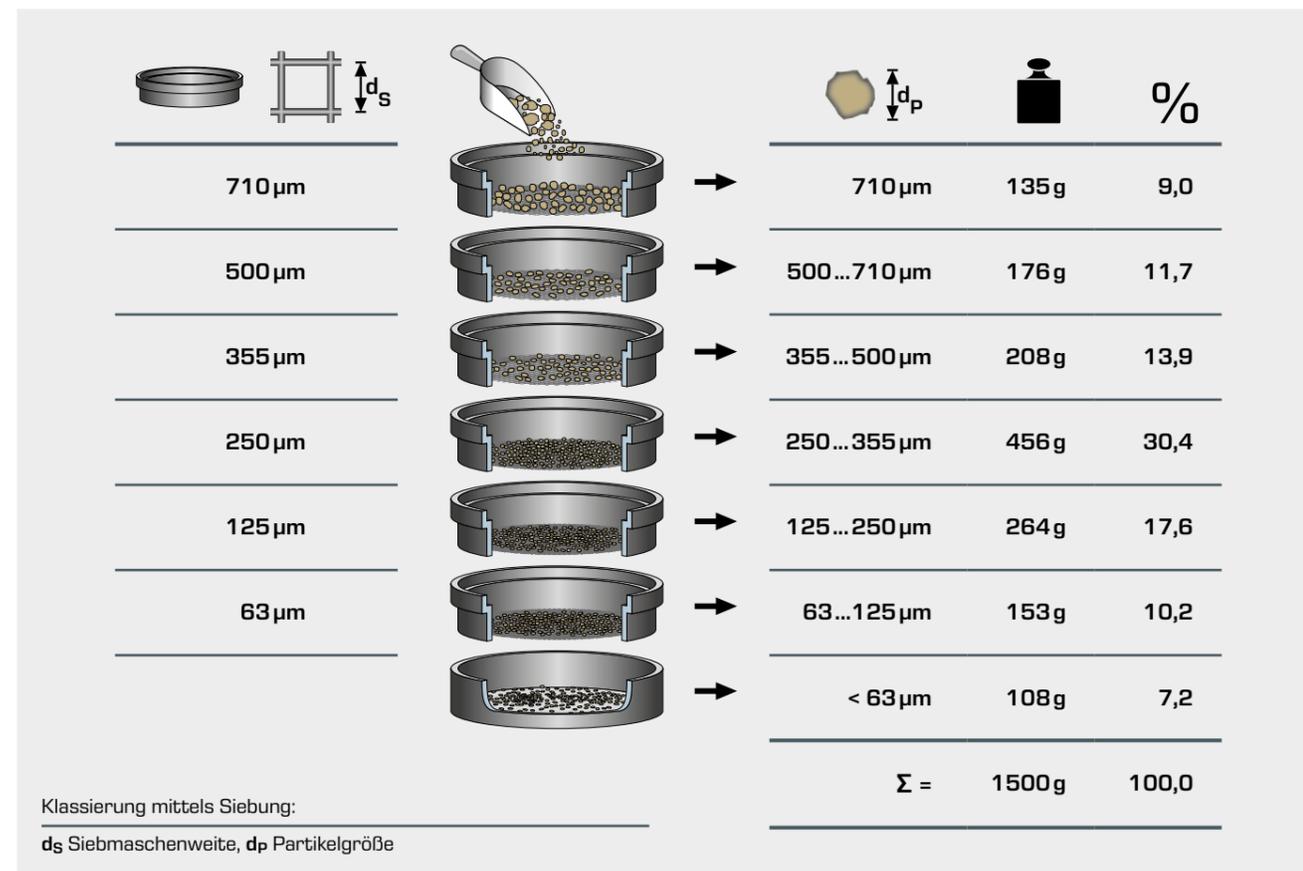
## Klassieren

Klassieren ist ein mechanisches Trennverfahren für Feststoffgemische. Man nutzt dabei die geometrischen Merkmale (Größe) oder auch die Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Partikel für den Trennprozess aus. Dementsprechend unterscheidet man zwischen Sieb- und Stromklassieren.

Im idealen Fall trennt ein Klassiergerät ein Aufgabegut mit unterschiedlichen Partikelgrößen in Grob- und Feingut auf. Dabei würden sich im Grobgut alle Partikel wiederfinden, die größer als eine bestimmte Trennkorngröße sind und im Feingut diejenigen, die kleiner sind.

Das einfachste Beispiel für ein Klassiergerät ist ein Sieb. In diesem Fall ist die Trennkorngröße durch die Siebmaschenweite vorgegeben. Mit der dargestellten Anordnung von Sieben ist es möglich, ein Aufgabegut in mehrere Klassen von Partikelgrößen aufzutrennen.

Ein Anwendungsbeispiel für eine solche Anordnung (jedoch mit größeren Siebmaschenweiten) ist die Abtrennung von Schotter, Kies und Sand aus dem Brechgut eines Steinbruchs.



Beim **Sieben** wird jedes Partikel seiner Größe und Form nach mit einer Siebmasche verglichen. Das Passieren der Siebmaschen kann bei unregelmäßig geformten Partikeln je nach deren Lage behindert sein. Die Partikel können sich auch gegenseitig behindern oder aneinander haften. Es ist deshalb notwendig, jedem Partikel mehrmals die Gelegenheit zu bieten, die Maschen zu passieren. Das kann z.B. durch vibrierende, taumelnde, werfende oder horizontale Bewegungen der Siebe erreicht werden.

Das **Stromklassieren** kann in Gasen (Luft) oder Flüssigkeiten (Wasser) erfolgen.

Beim **Nassstromklassieren** nutzt man die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten von Partikeln in einem Flüssigkeitsstrom als Trennmerkmal. Die Sinkgeschwindigkeit hängt von Größe, Dichte und Form der einzelnen Partikel und den daraus resultierenden Strömungswiderstands- und Gewichtskräften ab.

Beim **Windsichten** wird an Stelle einer Flüssigkeit ein Luftstrom zum Klassieren verwendet. Die zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten des Trennprinzips sind hierbei mit denen der Nassstromklassierung identisch. Windsichter werden z.B. für die Reinigung von Getreide eingesetzt. Dabei werden giftige Bestandteile wie Mutterkorn abgetrennt.

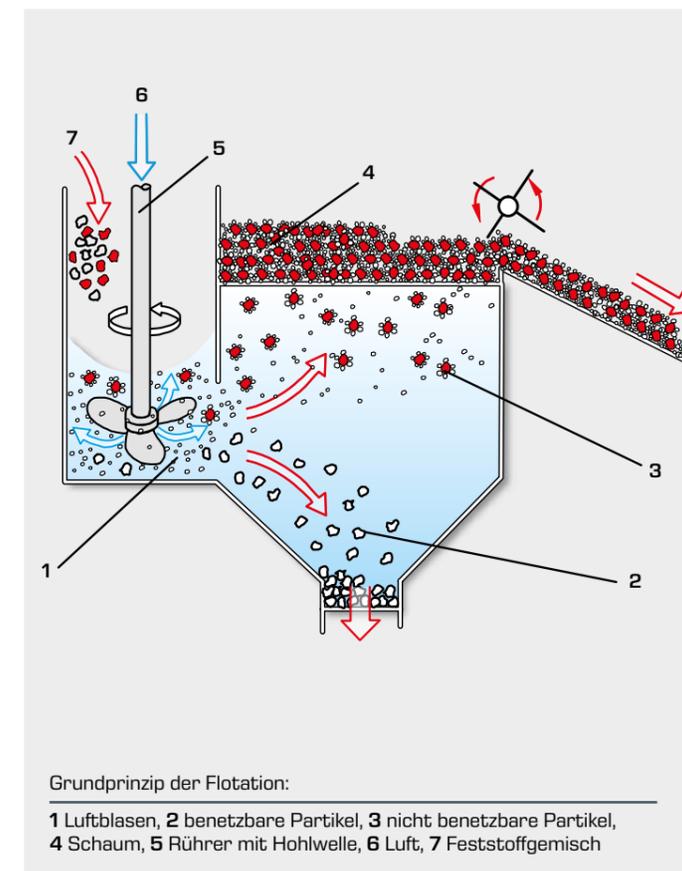
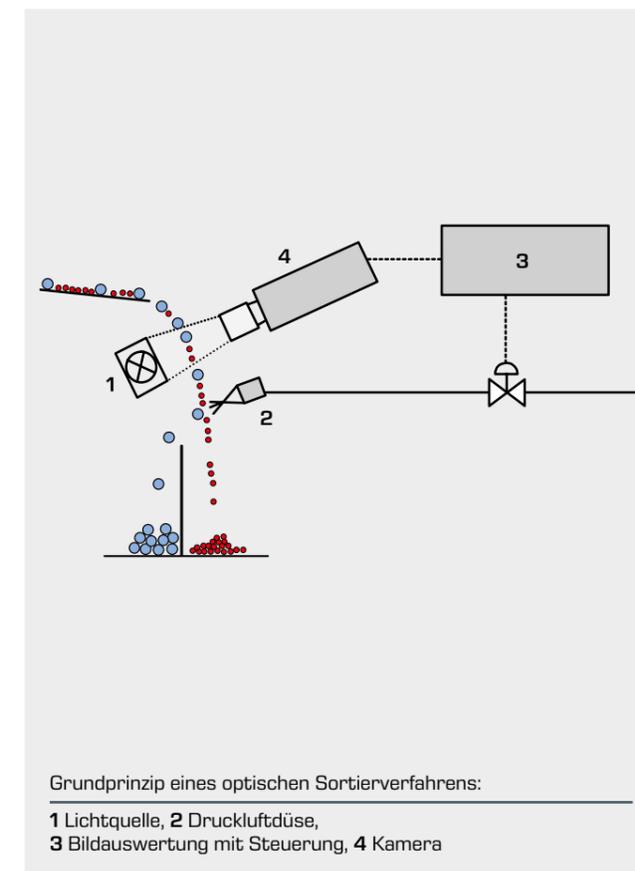
## Basiswissen

## Sortieren

Sortieren ist ein mechanisches Trennverfahren, bei dem ein Feststoffgemisch mit unterschiedlichen stofflichen Merkmalen in Fraktionen mit gleichen stofflichen Merkmalen aufgeteilt wird. Beim Sortieren macht man sich Eigenschaften wie Dichte, Farbe, Form, Benetzbarkeit oder Magnetisierbarkeit zu Nutze.

Bei der **Dichte** als Trennmerkmal ist eine **Schwimm-Sink-Sortierung** geeignet. Ein Feststoffgemisch wird in eine Flüssigkeit gegeben. Die Partikel des Gemisches mit geringerer Dichte als die der Flüssigkeit schwimmen an der Oberfläche, während Partikel höherer Dichte absinken. Ein Einsatzgebiet ist die Kohlaufbereitung. Dabei wird die Kohle vom Nebengestein abgetrennt.

Beim **Magnetscheiden** wird ein Feststoffgemisch nach den **magnetischen** Eigenschaften seiner Bestandteile zerlegt. Magnetscheider werden z.B. bei der Kohle- und Erzaufbereitung verwendet.



**Form und Farbe** bestimmter Partikel aus einem Feststoffgemisch können mit hochauflösenden Kameras erfasst werden. Über eine spezielle Auswerteelektronik können die erkannten Partikel mit einem Luftstrom aus dem Gemisch abgetrennt werden. **Optische Sortierverfahren** werden beim Recycling von Glas eingesetzt.

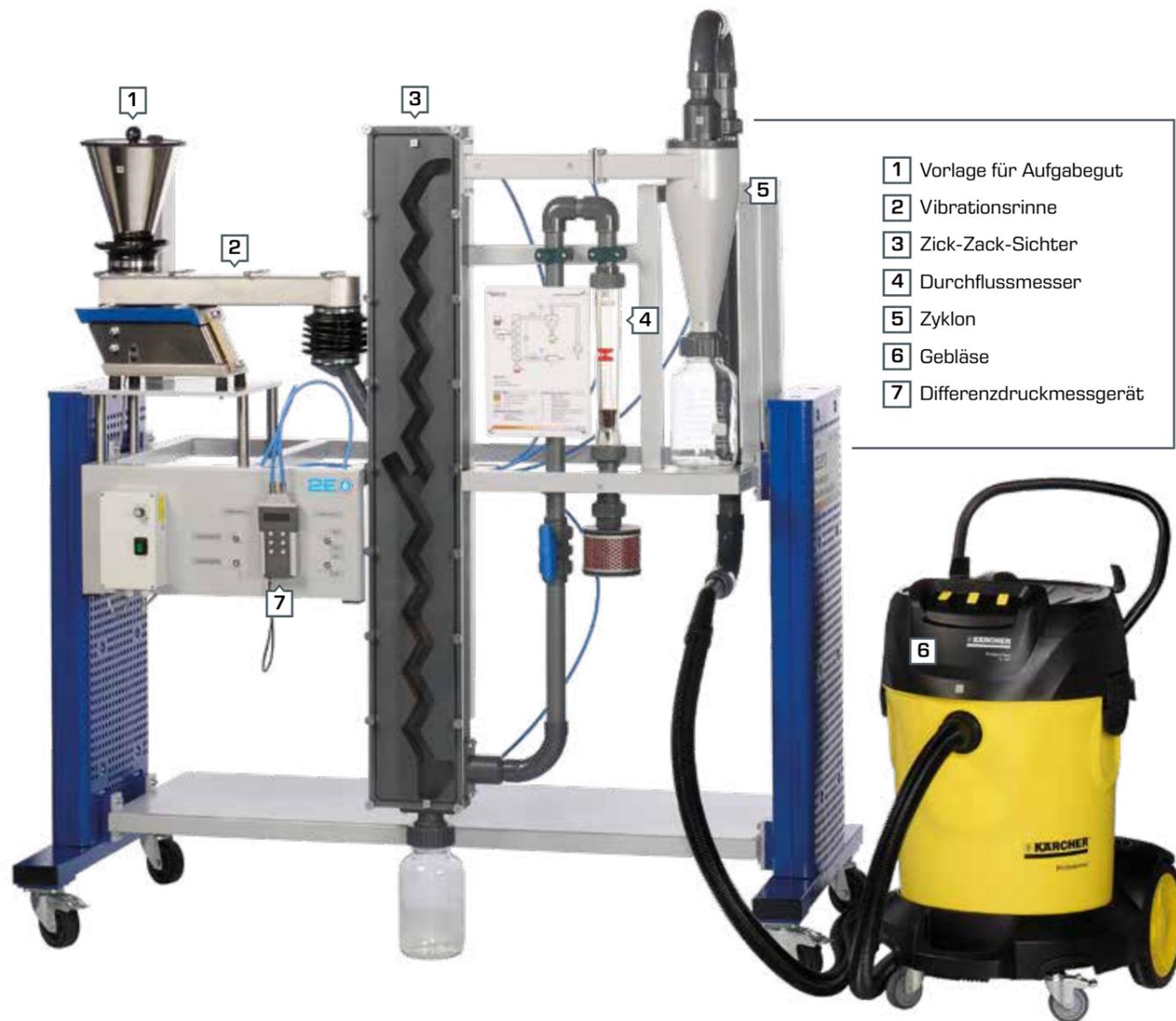
Die **Benetzbarkeit** bestimmter Stoffe mit Wasser sorgt bei der **Flotation** für die Sortierung feinkörniger Feststoffe. Das zu trennende Feststoffgemisch wird in einen Behälter mit Wasser gegeben. In das Wasser werden Luftblasen eingebracht. An den Feststoffpartikeln, die schwer mit Wasser benetzbar sind, haften die Luftblasen. Diese Partikel werden mit den Blasen an die Wasseroberfläche getragen und bilden dort einen feststoffhaltigen Schaum, der abgeschöpft werden kann. An den wasserbenetzbaren Partikeln haften keine Luftblasen. Sie bleiben in Suspension oder sinken zu Boden. Die Flotation ist das am häufigsten angewandte Verfahren zur Sortierung von Partikeln < 0,5 mm.

## Übersicht CE 275 Windsichtung

### Windsichtung mit Zick-Zack-Sichter: ein mechanisches Trennverfahren

Die Windsichtung ist ein mechanisches Trennverfahren aus dem Bereich der klassischen Verfahrenstechnik. In der Abfallwirtschaft wird dieses Verfahren zur Trennung verschiedener Abfälle eingesetzt, z.B. um Staub, Sand oder nicht verwertbare Stoffe von den Wertstoffen zu trennen. Hierfür werden überwiegend Zick-Zack-Sichter eingesetzt.

Dieses Lehrgerät ist hervorragend dafür geeignet, die theoretischen Grundlagen dieses Verfahrens anschaulich und praxisgerecht zu vermitteln. Hauptelement von CE 275 ist ein 20-stufiger Zick-Zack-Sichter, der mit einer transparenten Abdeckung versehen ist. Dadurch können Sie den Trennvorgang im Zick-Zack-Kanal über die gesamte Höhe optimal beobachten.



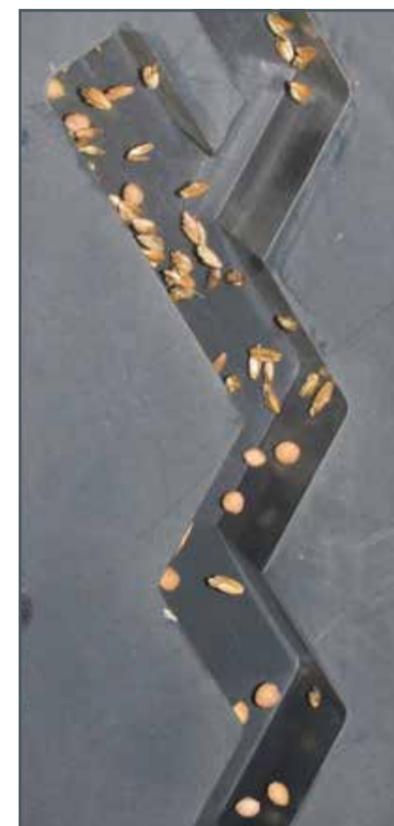
- 1 Vorlage für Aufgabegut
- 2 Vibrationsrinne
- 3 Zick-Zack-Sichter
- 4 Durchflussmesser
- 5 Zyklon
- 6 Gebläse
- 7 Differenzdruckmessgerät

### Funktionsprinzip

Das zu trennende Abfallgemisch (Aufgabegut) wird mit Hilfe einer Vibrationsrinne gleichmäßig in den Zick-Zack-Sichter gefördert. Das Gebläse erzeugt den zur Trennung erforderlichen, aufwärts gerichteten Luftstrom durch den Zick-Zack-Kanal. Selbstverständlich können Sie den Massenstrom des Aufgabegutes und den Volumenstrom der Luft einstellen. Die mit der Luft transportierte Fraktion des Aufgabegutes wird anschließend in einem Zyklon abgetrennt. Dies ermöglicht für den Luftstrom einen geschlossenen Kreislauf. Der Zick-Zack-Sichter und der Zyklon sind jeweils mit einer Differenzdruckmessung ausgestattet.



CE 275 während des Probebetriebes:  
Die Vibrationsrinne fördert das zu trennende Gemisch aus Dinkelspelz und Kirschkernen gleichmäßig zum Zick-Zack-Sichter.



In dem Zick-Zack-Kanal lässt sich die Trennung des Gemisches eindrucksvoll und anschaulich beobachten.

Dieses Gerät wurde von unseren erfahrenen Ingenieuren in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik an der Hochschule Anhalt entwickelt.

**Hochschule Anhalt**  
Anhalt University of Applied Sciences

### Empfohlenes Zubehör



Zur Auswertung der Versuche empfehlen wir unsere Siebmaschine CE 264.

### Lerninhalte

- Grundprinzip der Windsichtung kennenlernen
  - Einfluss des Massenstroms und des Luftvolumenstroms auf
    - ▶ Feingutanteil
    - ▶ Güte der Trennung
    - ▶ Druckverlust des Sichters
    - ▶ Druckverlust des Zyklons
  - ▶ Fraktionsbilanz
  - ▶ Trenngradkurve
  - ▶ Trennkorngröße
  - ▶ Trennschärfe
- } mit  
CE 264

Zum Produkt:



**CE 275**  
Windsichtung

2E

**Beschreibung**

- Windsichtung mit einem Zick-Zack-Sichter
- transparenter Kanal zur Beobachtung des Trennprozesses
- praxisgerechte Versuche im Labormaßstab

Mit Zick-Zack-Sichtern ist das Klassieren von Feststoffgemischen möglich. Das zu trennende Feststoffgemisch wird in den Aufgabetrichter gefüllt. Über eine Vibrationsrinne wird das Gemisch dem Zick-Zack-Kanal des Sichters in mittlerer Höhe zugeführt. Im senkrechten Kanal bewegt sich ein Luftstrom aufwärts. Abhängig von der Geometrie und der Dichte der Partikel werden sie von dem Luftstrom mitgenommen oder fallen aufgrund der Schwerkraft nach unten. An jedem Knick des Kanals durchquert das Feststoffgemisch den Luftstrom und fällt auf die gegenüberliegende Sichterwand. Dies entspricht einer Sichtstufe. Aufgrund der Strömungsverhältnisse bildet sich zwischen zwei Knicken des Zick-Zack-Kanals eine Wirbelwalze aus. Sie sorgt dafür, dass sich der Feststoff etwa senkrecht zum Luftstrom bewegt. Auf diese Weise findet an jedem Knick eine Querstromsichtung statt. Die Hintereinanderschaltung vieler solcher Stufen führt zu sehr scharfen Trennungen.

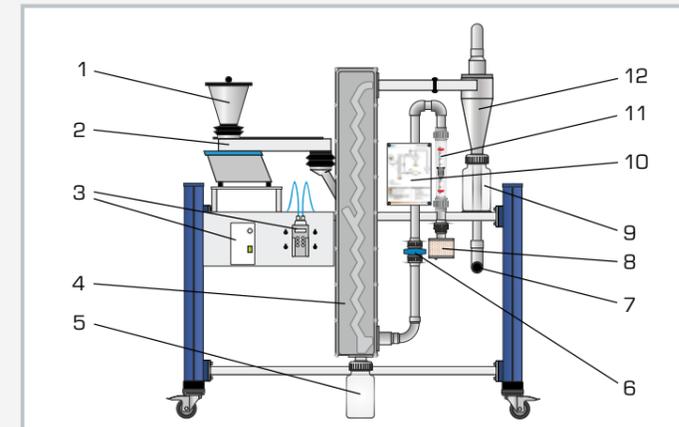
CE 275 ist mit einem 20-stufigen Zick-Zack-Kanal ausgerüstet. Transparentes Material ermöglicht die optimale Beobachtung der Prozesse im Kanal.

Ein Gebläse erzeugt den Luftstrom. Der Volumenstrom der Luft und der Feststoffmassenstrom sind einstellbar. Das mit dem Luftstrom aufwärts transportierte Feingut wird mit einem Zyklon abgeschieden. Druckmesspunkte an den relevanten Positionen des Versuchsaufbaus erlauben die Ermittlung von Druckverlusten.

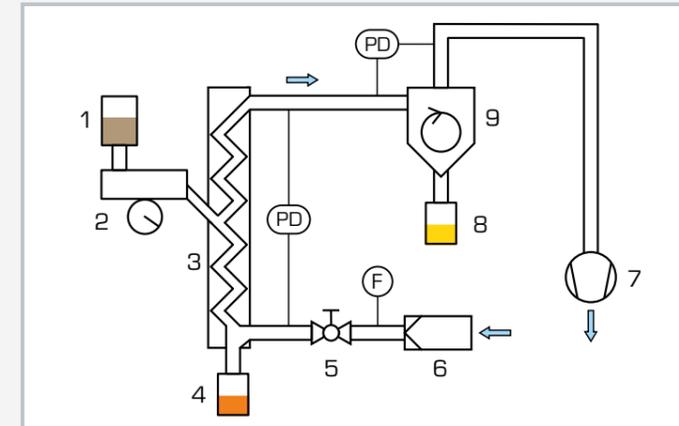
Als Aufgabegut wird Aktivkohle mit unterschiedlichen Partikelgrößen empfohlen. Zur Partikelgrößenanalyse von Aufgabegut, Grob- und Feingut werden eine Waage und eine Siebmaschine (CE 264) empfohlen.

**Lerninhalte / Übungen**

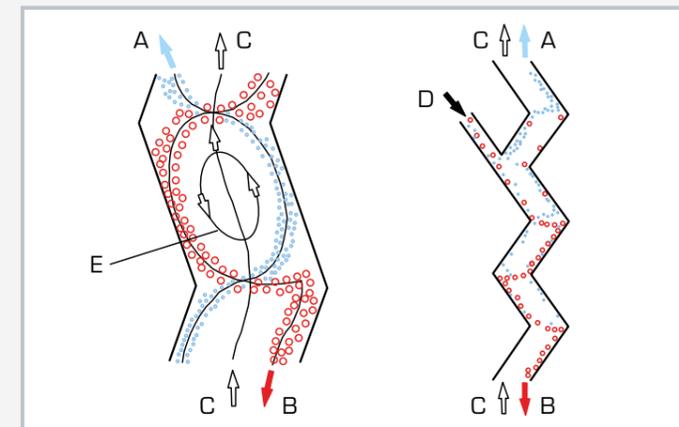
- Grundprinzip der Windsichtung kennenlernen
- Sortieren
  - ▶ Grob- und Feingutanteil
  - ▶ Güte der Trennung
- in Abhängigkeit des Feststoffmassenstroms und des Volumenstroms der Luft
- Klassieren (mit CE 264)
  - ▶ Fraktionsbilanz
  - ▶ Trenngradkurve
  - ▶ Trennkorngröße
  - ▶ Trennschärfe
- in Abhängigkeit des Feststoffmassenstroms und des Volumenstroms der Luft
- Druckverluste von
  - ▶ Sichter
  - ▶ Zyklon in Abhängigkeit des Feststoffmassenstroms und des Volumenstroms der Luft

**CE 275**  
Windsichtung

1 Behälter Aufgabegut, 2 Vibrationsrinne, 3 Anzeige- und Bedienelemente, 4 Sichter, 5 Behälter Grob- und Feingut, 6 Ventil, 7 Anschluss Gebläse, 8 Filter, 9 Behälter Feingut, 10 Prozessschema, 11 Durchflussmesser, 12 Zyklon



1 Behälter Aufgabegut, 2 Vibrationsrinne, 3 Sichter, 4 Behälter Grob- und Feingut, 5 Hahn, 6 Filter, 7 Gebläse, 8 Behälter Feingut, 9 Zyklon; F Volumenstrom, PD Differenzdruck



Grundprinzip der Zick-Zack-Sichtung: A Feingut, B Grob- und Feingut, C Luftstrom, D Aufgabegut, E Wirbelwalze

**Spezifikation**

- [1] Zick-Zack-Sichter zum Trennen von Feststoffgemischen
- [2] Aufgabetrichter mit Vibrationsrinne für Zuführung des Feststoffgemisches zum Sichter
- [3] Dosierung des Aufgabeguts über Abstand Trichterauslauf zur Vibrationsrinne und Frequenz der Vibrationsrinne
- [4] Trennung des Feststoffgemisches in Grob- und Feingut mit Luftstrom im 20-stufigen Zick-Zack-Kanal
- [5] Erzeugung des Luftstromes mit Gebläse; Einstellung mit Ventil
- [6] Abscheidung des Feingutes vom Luftstrom durch Gaszyklon mit Tangentialeinlauf
- [7] 3 Behälter für Aufgabegut, Grob- und Feingut
- [8] Erfassung des Volumenstroms der Luft und der Differenzdrücke über Sichter und Zyklon

**Technische Daten****Vibrationsrinne**

- Förderleistung: max. 10kg/h
- Schwingfrequenz: max. 3000min<sup>-1</sup>

**Zick-Zack-Sichter**

- Höhe: ca. 1500mm
- Querschnittsfläche: 40x50mm

**Zyklon**

- Höhe: 550mm
- Durchmesser: ca. 150mm

**Gebläse**

- Volumenstrom: max. 600m<sup>3</sup>/h
- Leistung: ca. 3600W

**Behälter**

- Aufgabetrichter: 3L
- Grob- und Feingut: 2L
- Feingut: 2L

**Messbereiche**

- Differenzdruck: 2x 0...100mbar
- Volumenstrom: 10...100m<sup>3</sup>/h

**230V, 50Hz, 1 Phase**

- LxBxH: 1660x790x1930mm (Versuchsstand)
- Gewicht: ca. 180kg (Versuchsstand)
- LxBxH: 660x510x880mm (Gebläse)
- Gewicht: ca. 30kg (Gebläse)

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 Gebläse
- 2 Gebinde Aufgabegut
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

**CE 264**  
Siebmaschine**Beschreibung**
**professionelles Analysegerät für CE 245 und CE 275**

Mit der Siebmaschine ist es möglich, ein Feststoffgemisch in mehrere Klassen von Partikelgrößen aufzutrennen. Beim Sieben wird jedes Partikel seiner Größe und Form nach mit einer Siebmaschine verglichen. Das Passieren der Siebmaschine kann bei unregelmäßig geformten Partikeln je nach deren Lage behindert sein. Durch die Vibrationen der Siebmaschine wird jedem Partikel mehrmals die Möglichkeit geboten, die Maschen zu passieren. Im oberen Bereich erfolgt zunächst die Abtrennung der größeren Partikel. Nach unten hin nimmt die Siebmaschenweite ab.

Zur Anpassung an die jeweiligen Anforderungen befinden sich mehrere Siebe mit unterschiedlichen Siebmaschenweiten im Lieferumfang. Eine Waage ermöglicht die Bestimmung der Massen der einzelnen abgetrennten Klassen, um die Partikelgrößenverteilung zu bestimmen.

**Lerninhalte / Übungen**

- Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen

**Spezifikation**

- Siebmaschine zur Partikelgrößenanalyse als Zubehör für CE 245 und CE 275
- Siebdauer und Schwingungshöhe einstellbar
- 11 Siebe mit unterschiedlichen Maschenweiten
- Waage zur Bestimmung der Massenanteile der abgetrennten Klassen

**Technische Daten**

Ø der Siebe: je 200mm  
Höhe der Siebe: je 50mm

**Siebmaschine**

- Siebdauer: 0...60min
- Schwingungshöhe: 0...3mm
- Maschenweite der Siebe
  - 45µm
  - 63µm
  - 125µm
  - 250µm
  - 500µm
  - 710µm
  - 1000µm
  - 1250µm
  - 1600µm
  - 2000µm
  - 4000µm

**Waage**

- max. Einwaage: 2200g
- Auflösung: 10mg

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 400x400x800mm (Siebmaschine)  
LxBxH: 200x270x100mm (Waage)  
Gewicht: ca. 30kg

**Lieferumfang**

- Siebmaschine
- Satz Siebe
- Waage
- Anleitung

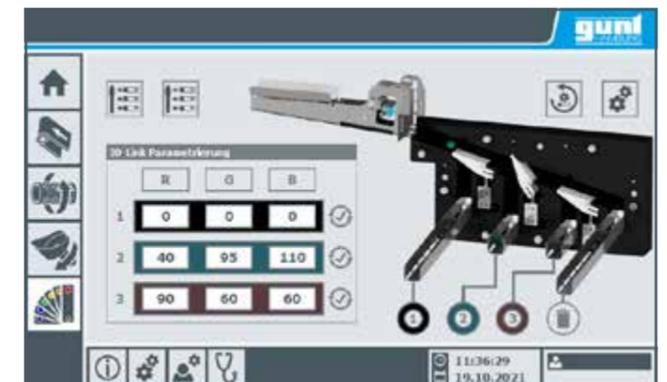
**Übersicht**  
**MT174 Sortieranlage**

Die Sortieranlage MT174 ist einem typischen Trennprozess aus der Abfallwirtschaft nachempfunden und beinhaltet eine Klassierung mit einem Trommelsieb und eine Farbsortierung.

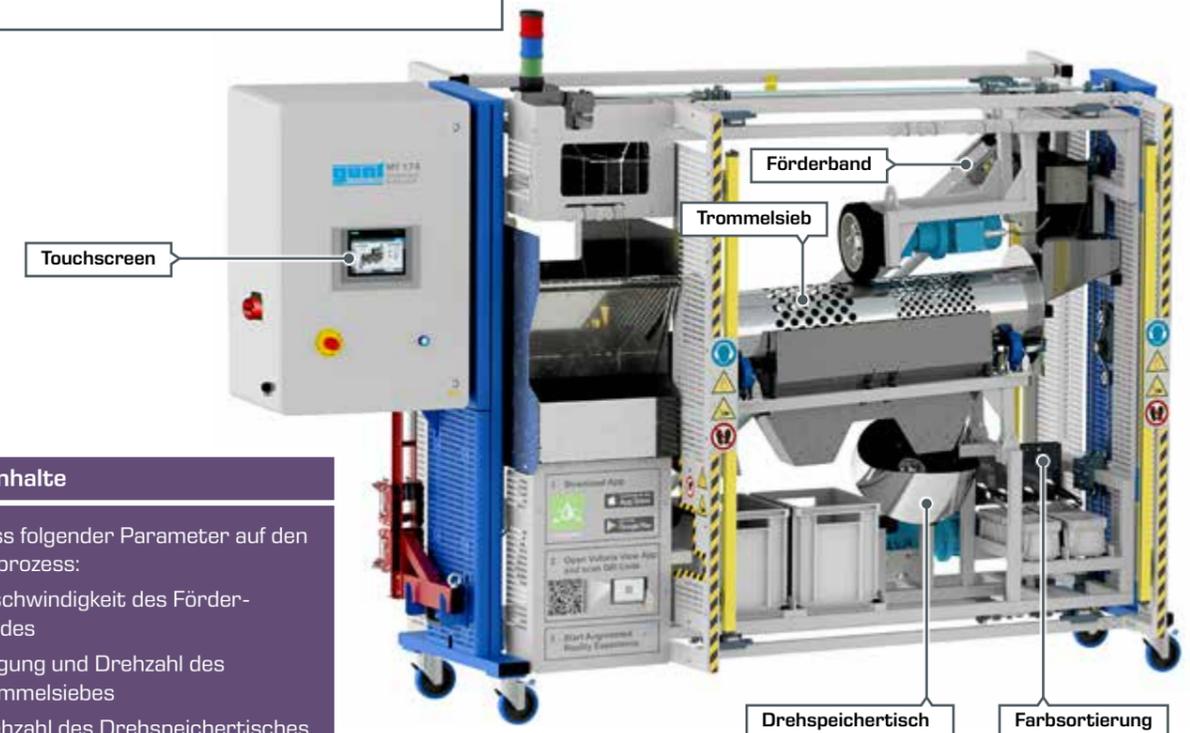
Wartung und Instandhaltung sind Voraussetzungen für den zuverlässigen Betrieb einer Sortieranlage. Daher können zu Ausbildungszwecken auch Instandhaltungsarbeiten an der Sortieranlage durchgeführt werden. Wird die Anlage im Trainingsmodus betrieben, generiert die SPS eigenständig zeit- und sensorgesteuerte Meldungen für durchzuführende Instandhaltungsarbeiten. Zur Visualisierung der Instandhaltungsarbeiten steht eine Augmented Reality Oberfläche für mobile Endgeräte zur Verfügung.

- Sortieranlage im Labormaßstab mit industriellen Komponenten
- Trennung in 3 Größenfraktionen mit Trommelsieb
- Farbsortierung in 3 Fraktionen
- Steuerung der Versuchsanlage mit einer SPS, über Touchscreen bedienbar
- Augmented Reality zur Visualisierung von Instandhaltungsarbeiten

Die Anlage wird von einer modernen SPS mit Touchscreen gesteuert. Zwecks Übersichtlichkeit steht für jede funktionelle Gruppe eine separate Bedienoberfläche zur Verfügung. Alle für den Trennprozess relevanten Parameter können mit der SPS eingestellt werden. Hierzu zählen z.B. die Drehzahl und Neigung des Trommelsiebes. Ferner können die Farben der zu sortierenden Partikel in der SPS definiert werden.



Screenshot der SPS (Farbsortierung)

**Lerninhalte**

- Einfluss folgender Parameter auf den Trennprozess:
  - Geschwindigkeit des Förderbandes
  - Neigung und Drehzahl des Trommelsiebes
  - Drehzahl des Drehspeichertisches
  - Frequenz der Vibrationsrinnen
  - Farbdefinition für die Farbsortierung
- Instandhaltungsarbeiten an einer industriellen Anlage (unterstützt durch Augmented Reality)

Zum Produkt:



**CE 280**  
Magnetscheidung

2E

**Beschreibung**

- **Sortierung mit einem Trommelmagnetscheider**
- **Zuführung des Aufgabegutes durch Vibrationsrinne mit einstellbarer Schwingweite**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

Beim Sortieren findet eine Trennung aufgrund von stofflichen Merkmalen statt.

Magnetscheiden ist ein Sortierverfahren, bei dem man sich die Magnetisierbarkeit von Teilen eines Feststoffgemisches zu Nutze macht. Magnetscheider werden oft in der Kohle- und Erzaufbereitung eingesetzt.

Bei CE 280 wird das zu trennende Feststoffgemisch in den Aufgabetrichter gefüllt. Eine Vibrationsrinne fördert das Gemisch auf eine rotierende, unmagnetische Trommel. Ihre Drehzahl kann über ein Potentiometer eingestellt werden. In einem Teilbereich der Trommel befindet sich ein feststehender Permanentmagnet.

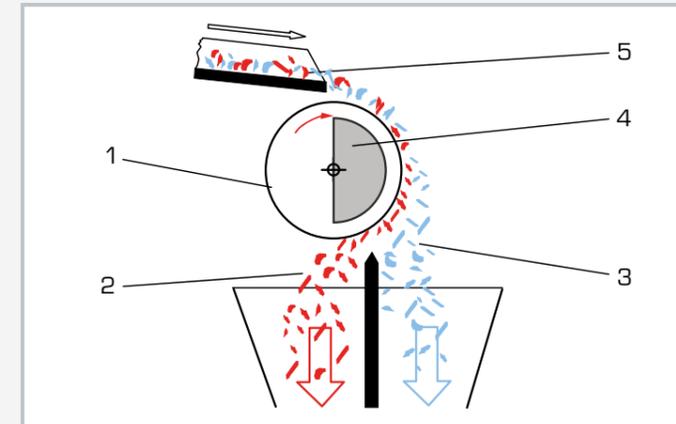
Nicht magnetisierbare Bestandteile fallen aufgrund der Schwerkraft in einen Sammelbehälter. Magnetisierbare Bestandteile haften im Bereich des Magneten an der Trommel, werden weiter mitgeführt und fallen in einen weiteren Behälter, sobald sie sich außerhalb des magnetischen Teilbereiches befinden. Der Massenstrom des Aufgabegutes kann über den Abstand des Trichterauslaufes zur Vibrationsrinne, der Schwingweite und der Frequenz der Rinne eingestellt werden. Als Aufgabegut wird eine Mischung aus Sand und kleinen Stahlteilen, wie z.B. Sechskantmuttern, empfohlen und mitgeliefert.

**Lerninhalte / Übungen**

- Grundprinzip und Betriebsverhalten eines Trommelmagnetscheiders kennenlernen
- Effektivität des Trennprozesses in Abhängigkeit von
  - ▶ Aufgabemassenstrom
  - ▶ Mischungsverhältnis des Aufgabegutes
  - ▶ Art des Aufgabegutes
  - ▶ Trommeldrehzahl

**CE 280**  
Magnetscheidung

1 Aufgabetrichter mit Höhenverstellung, 2 Bedienelemente Vibrationsrinne, 3 Bedienelemente Magnetscheider, 4 Behälter für Feststoffmischung, 5 Behälter magnetische Stoffe, 6 Behälter unmagnetische Stoffe, 7 Magnetscheider, 8 Vibrationsrinne



Grundprinzip von Trommelmagnetscheidern: 1 rotierende Trommel (unmagnetisch), 2 magnetisierbare Bestandteile, 3 nicht magnetisierbare Bestandteile, 4 Permanentmagnet, 5 Aufgabegut

**Spezifikation**

- [1] Trommelmagnetscheider zur Abtrennung von magnetisierbaren Teilen aus einem Feststoffgemisch
- [2] Abtrennung mit feststehendem Permanentmagnet im Teilbereich einer rotierenden, unmagnetischen Trommel
- [3] Aufgabetrichter mit Vibrationsrinne für Zuführung des Feststoffgemisches zur Trommel
- [4] Dosierung des Aufgabegutes über Abstand Trichterauslauf zur Vibrationsrinne, Schwingweite und Frequenz der Vibrationsrinne
- [5] Trommeldrehzahl über Elektromotor mit Potentiometer einstellbar
- [6] 2 Behälter aus Stahl für getrennte Fraktionen und 1 Behälter für Feststoffmischung
- [7] Aufgabegut: Sand und Sechskantmuttern

**Technische Daten**

Volumen Aufgabetrichter: 25L

Vibrationsrinne

- Schwingweite: 0,2...1,5mm
- Schwingfrequenz: 50Hz oder 100Hz

Trommel

- Ø 220mm
- Länge: 300mm
- Magnetbereich: 180°
- Drehzahl: 0...30min<sup>-1</sup>

Motor

- Leistung: 250W

Max. Teilchengröße

- unmagnetisch: 20mm
- magnetisch: 20mm

Behälter

- 2x 15L
- 1x 20L

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1500x700x1700mm

Gewicht: ca. 175kg

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 Schaufel
- 1 Gebinde Sand
- 500 Muttern
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

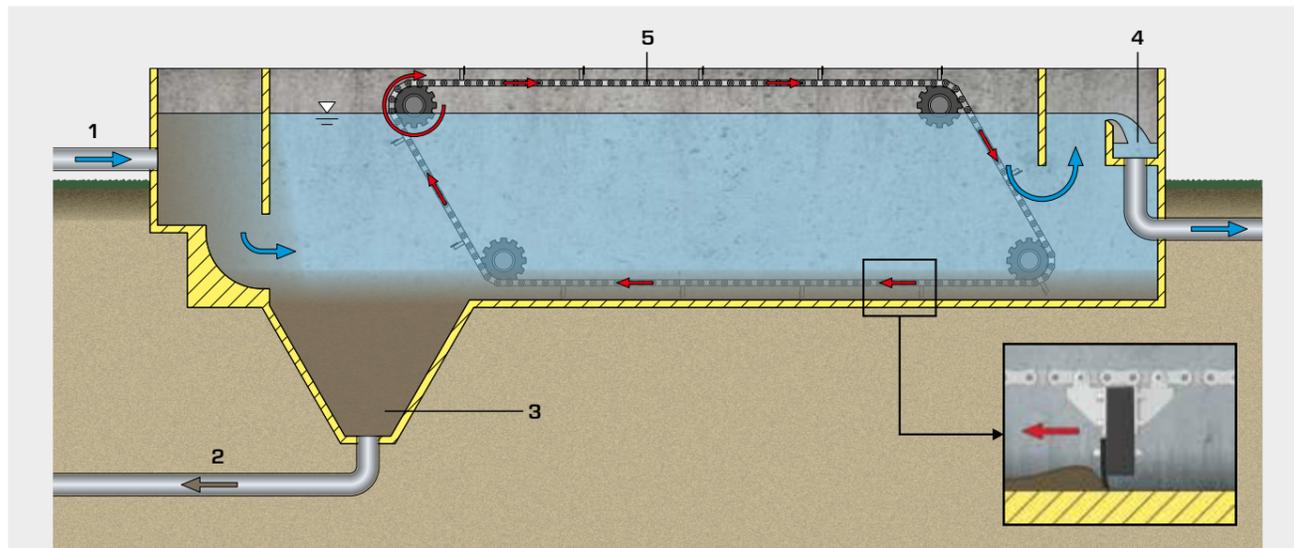
## Basiswissen

## Sedimentation

Für die Trennung unterschiedlicher Phasen nutzt die Mechanische Verfahrenstechnik in vielen Fällen die Schwerkraft. Sie kann genutzt werden, um eine feste Phase aus einem Fluid abzutrennen. Befinden sich Feststoffpartikel in einem Fluid in Schwebelage, so sinken diese aufgrund der Schwerkraft nach unten. Voraussetzung hierfür ist, dass die Dichte des Feststoffs größer als die des Fluids ist. Der Prozess wird als Sedimentation bezeichnet. Fluid ist der übergeordnete Begriff für Gase und Flüssigkeiten. Er wird verwendet, weil die meisten physikalischen Gesetze für beide gleichermaßen gelten.

Bei der **Abtrennung von festen Stoffen aus Gasen** spricht man auch von Staubabscheidung. Die feste Phase kann einerseits ein Wertstoff sein. Andererseits kann die feste Phase ein unerwünschter Stoff sein (Gasreinigung). Bei Schwerkraftabscheidung wird der Gasstrom verlangsamt durch einen Abscheidkanal geführt. Die Partikel sinken auf dem Weg ab und werden gesammelt.

Die **Trennung von Fest-Flüssig-Gemischen** (Suspensionen) findet in der Praxis in Absetzbecken statt. Diese werden kontinuierlich von der Suspension durchströmt. Die Form der Grundfläche kann rechteckig oder rund sein. Bei rechteckigen Becken strömt die Suspension an einer Seite zu und läuft über den Rand der gegenüberliegenden Seite ab. Auf diesem Weg sinken die Feststoffpartikel auf den Grund des Beckens. Zur Abfuhr des Feststoffes ist der Boden der Becken geneigt. Zusätzlich gibt es Einrichtungen, mit denen der abgesetzte Feststoff (Schlamm) vom Boden geräumt werden kann. Absetzbecken werden meist bei der Wasserbehandlung eingesetzt.



Absetzbecken:

1 Zulauf Abwasser, 2 Schlammabzug, 3 Schlamm Sammeltrichter, 4 Überlauf gereinigtes Wasser, 5 Schlammräumer

Die **Sinkgeschwindigkeit** der Partikel ist die zentrale Größe zur Auslegung von Absetzbecken und Abscheidkanälen. Sie hängt direkt mit der Partikelgröße, Partikelform (Strömungswiderstand) und dem Dichteunterschied zwischen Fluid und Feststoff zusammen. Sind die Partikel in einer Suspension sehr fein oder ist der Dichteunterschied zwischen Fluid und Feststoff gering, ist die Sinkgeschwindigkeit sehr klein. Eine technisch sinnvolle

Abscheidung durch Sedimentation ist dann nicht möglich. Eine weitere Größe, die die Sinkgeschwindigkeit in Flüssigkeiten beeinflusst, ist die Konzentration der Feststoffpartikel. Bei hohen Konzentrationen findet eine behinderte Sedimentation statt. Die sogenannte Schwarmsinkgeschwindigkeit wird mit zunehmender Konzentration kleiner als die der Einzelpartikel.

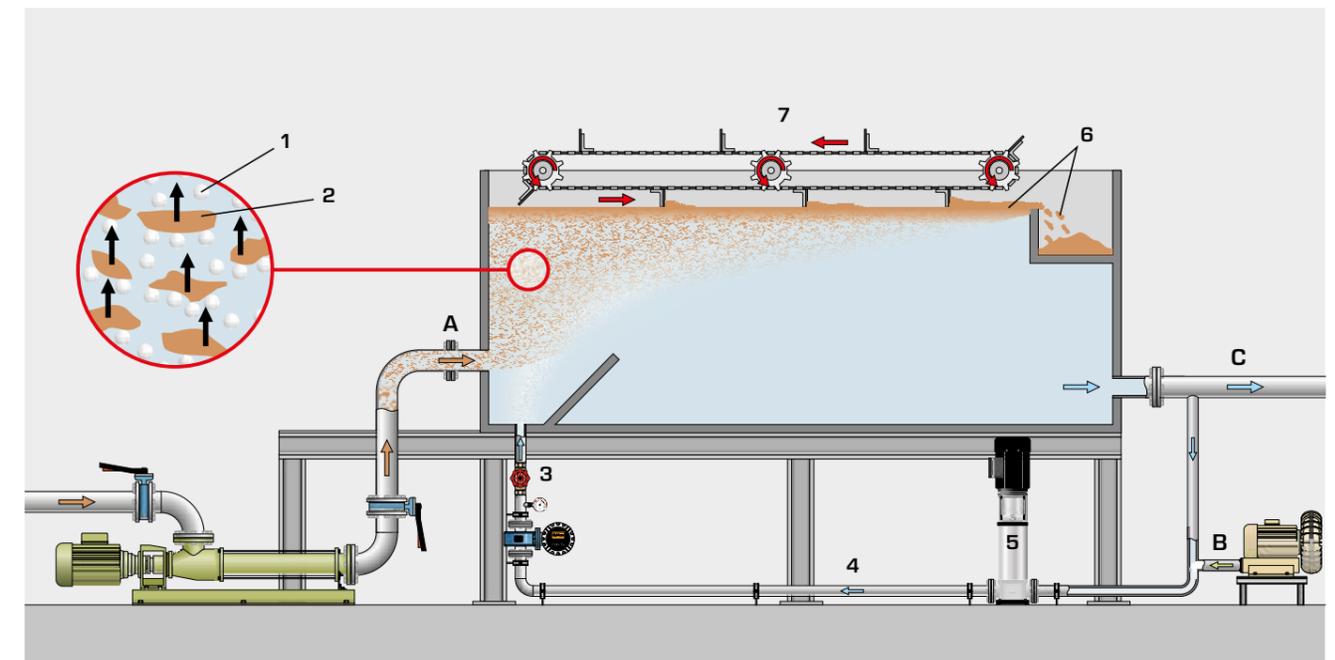
## Basiswissen

## Flotation

Feststoffe, deren Dichte nahezu gleich oder kleiner als die von Wasser ist, lassen sich durch Sedimentation nicht abtrennen. Derartige Feststoffe würden nur sehr langsam sedimentieren bzw. in Schwebelage bleiben. Ziel der Flotation ist es, den Auftrieb der Feststoffe zu erhöhen. Dies erfolgt durch die Bildung feiner Gasblasen. Die Gasblasen haften an den Feststoffen und befördern sie an die Wasseroberfläche. Hier können die Feststoffe dann abgeschöpft werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Feststoffe hydrophob sind, also mit Luft besser benetzbar sind als mit Wasser. Die abgetrennten Feststoffe werden als Flo-

ttat bezeichnet. Wichtigste Einflussgröße auf die Flotation ist die Größe der Gasblasen. Je kleiner sie sind, desto geringer ist ihre Steiggeschwindigkeit. Dies wird dadurch kompensiert, dass sich kleine Gasblasen in höherer Anzahl an die Feststoffe anlagern als große Gasblasen.

Im Bereich der Wasserbehandlung wird überwiegend die **Druckentspannungsflotation** eingesetzt. Eine weitere Variante der Flotation ist die Elektroflotation. Beide Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich durch die Art der Gasblasenerzeugung.



Grundprinzip der Druckentspannungsflotation:

1 Luftblasen, 2 Feststoff, 3 Entspannungsventil, 4 Zirkulationswasser, 5 Pumpe, 6 Flotat, 7 Räumler  
A Rohwasser, B Druckluft, C Reinwasser

## Die Druckentspannungsflotation

Die Druckentspannungsflotation beruht darauf, dass sich die Löslichkeit von Luft in Wasser mit steigendem Druck erhöht (bei konstanter Temperatur). Bei diesem Verfahren wird ein Teilstrom des Reinwassers unter Druck mit Luft gesättigt (Zirkulationswasser). Das Zirkulationswasser wird anschließend über ein Entspannungsventil wieder in das Flotationsbecken eingeleitet. Durch die plötzliche Entspannung auf

Atmosphärendruck perlt die gelöste Luft schlagartig unter Bildung feiner Blasen aus. Ein Räumler befreit die Wasseroberfläche von dem Flotat. Um die Flotierbarkeit der Feststoffe zu verbessern, werden dem Rohwasser oftmals Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel zugegeben. Dadurch werden größere Feststoffe erzeugt, an denen sich mehr Luftblasen anlagern können.

## Anwendungsbeispiele

## Industrielle Wasserbehandlung

- Papierindustrie
- Lebensmittelindustrie
- Erdölraffinerien
- Kunststoffindustrie

## Kommunale Wasserbehandlung

- Nachklärung, wenn der Belebtschlamm schlechte Absetzeigenschaften hat
- ergänzend oder anstelle der Vorklärung

# Erstklassige Handbücher



Die Programmpolitik von GUNT lautet: qualitativ hochwertige Hardware und klar entwickeltes didaktisches Begleitmaterial sichern den Lehr- und Lernerfolg eines Versuchsgeräts.

Kernstück dieses Begleitmaterials sind von uns ausgeführte Referenzversuche. Die Beschreibung des Versuchs enthält den konkreten Versuchsaufbau bis hin zur Interpretation der gefundenen Ergebnisse. Eine Gruppe erfahrener Ingenieure entwickelt und pflegt das didaktische Begleitmaterial.

Sollten dennoch Fragen unbeantwortet bleiben, stehen wir Ihnen natürlich gerne telefonisch – im Bedarfsfall vor Ort – zur Verfügung.

## CE 115 Grundlagen der Sedimentation



### Beschreibung

#### ■ Trennung von Suspensionen durch Sedimentation

Die Sedimentation wird oft zur Klärung von Suspensionen eingesetzt. Dabei bewegen sich Feststoffpartikel aufgrund ihrer größeren Dichte in einer Flüssigkeit abwärts.

Mit CE 115 können die Sedimentationsprozesse in unterschiedlichen Suspensionen untersucht und verglichen werden. Dazu stehen fünf transparente, zylindrische Behälter zur Verfügung. Die Suspensionen werden in Messbechern angesetzt, in die herausnehmbaren Behälter eingefüllt und durch Schütteln gemischt. Die Behälter werden dann senkrecht an dem Versuchsgerät befestigt. Zur besseren Beobachtung des Sedimentationsprozesses sind die Behälter von hinten beleuchtet.

### Lerninhalte / Übungen

- Ermittlung und Vergleich der Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen in Suspensionen in Abhängigkeit von Feststoffdichte, Feststoffkonzentration, Flüssigkeitsdichte und -viskosität
- Einfluss von Flockungsmitteln auf die Sinkgeschwindigkeit

### Spezifikation

- [1] Grundlagenversuche zur Sedimentation
- [2] 5 transparente, skalierte Behälter zum Vergleich der Sinkgeschwindigkeit von Feststoffen in verschiedenen Suspensionen
- [3] Behälter zum Befüllen, Mischen und Reinigen herausnehmbar
- [4] Behälter zur besseren Beobachtung von hinten mit Leuchtstoffröhren beleuchtet
- [5] 3 Messbecher zum Herstellen der Suspensionen
- [6] Pyknometer zur Dichtebestimmung der Flüssigkeiten und Feststoffe
- [7] Stoppuhr zur Erfassung der Sedimentationsdauer
- [8] empfohlenes Zubehör: Waage, Flockungsmittel

### Technische Daten

- Behälter
- Länge: 1000mm
  - Innendurchmesser: 42mm
  - Teilung Skala: 1mm
  - Material: PMMA
- Leuchtstoffröhren
- Leistung: 6x 18W
- Messbecher
- Volumen: 2000ml
  - Teilung Skala: 50ml
- Stoppuhr
- Auflösung: 1/100sec

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 750x460x1160mm  
Gewicht: ca. 53kg

### Für den Betrieb erforderlich

Flockungsmittel (Empfehlung)

### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät, 3 Messbecher
- 1 Stoppuhr, 1 Pyknometer
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

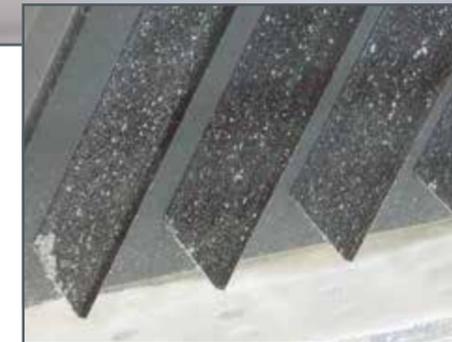
**Übersicht**
**HM 142 Sedimentation in Absetzbecken**

Die Sedimentation ist die einfachste Methode, um Feststoffpartikel aus einer flüssigen Phase abzutrennen. Daher ist dieses Verfahren in der Wasserbehandlung sehr verbreitet. Mit diesem Gerät können die Grundlagen dieses Trennverfahrens sehr anschaulich vermittelt werden. Im Fokus steht hierbei vor allem die Bestimmung der maximal möglichen, hydraulischen Oberflächenbelastung.

Großen Wert haben wir auf die visuelle Beobachtung des Sedimentationsprozesses gelegt. Daher werden überwiegend transparente Materialien verwendet. Ferner ist das Absetzbecken mit einer Beleuchtung ausgestattet.

Das Rohwasser wird durch Mischung einer konzentrierten Suspension mit Frischwasser hergestellt. Je nach Mischungsverhältnis erhält man so ein Rohwasser mit der gewünschten Feststoffkonzentration. Ein Rührwerk im Einlaufbereich des Absetzbeckens verhindert, dass die Feststoffe bereits vor dem Eintritt in die Versuchsstrecke sedimentieren. Der Wasserstand in dem Absetzbecken ist stufenlos einstellbar.

Vervollständigt wird das Gerät durch eine Lamelleneinheit, die Sie optional in das Absetzbecken einsetzen können. Je nach Farbe der verwendeten Schmutzstoffe stehen weiße und schwarze Lamellen zur Verfügung.



Durch die Verwendung transparenter Materialien und einer Beleuchtung lassen sich der Sedimentationsprozess und die Strömungsverhältnisse sehr gut beobachten.



Optional einsetzbare Lamelleneinheit

Zum Produkt:



 Lerninhalte
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Grundprinzip zur Abtrennung von Feststoffen aus Suspensionen in einem Absetzbecken</li> <li>■ Bestimmung der hydraulischen Oberflächenbelastung</li> <li>■ Einfluss folgender Parameter auf den Trennprozess:               <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Feststoffkonzentration</li> <li>▶ Durchfluss</li> <li>▶ Strömungsgeschwindigkeit im Einlauf</li> <li>▶ Wasserstand im Absetzbecken</li> </ul> </li> <li>■ Untersuchung der Strömungsverhältnisse</li> <li>■ Einfluss von Lamellen auf den Sedimentationsprozess</li> </ul>

## HM 142

### Sedimentation in Absetzbecken



2E

#### Beschreibung

- transparentes Absetzbecken zur Beobachtung des Trennprozesses
- Beleuchtung zur optimalen Visualisierung der Strömungsverhältnisse
- Verwendung von Lamellen im Absetzbecken möglich

In Absetzbecken werden Feststoffe aus Suspensionen unter Einfluss der Schwerkraft abgetrennt. Dabei muss die Dichte der Feststoffpartikel größer als die der Flüssigkeit sein. HM 142 ermöglicht es, die Abtrennung von Feststoffen aus einer Suspension in einem Absetzbecken zu untersuchen.

In einem Behälter wird zunächst eine konzentrierte Suspension aus Wasser und dem abzutrennenden Feststoff angesetzt. Eine Pumpe fördert die konzentrierte Suspension zum Absetzbecken. Vor dem Absetzbecken vermischt sich die Suspension mit Frischwasser. Das so erzeugte Rohwasser strömt über ein Zulaufwehr in das Absetzbecken. Vor dem Zulaufwehr befindet sich ein Rührwerk. Dadurch wird verhindert, dass die Feststoffe bereits vor dem Eintritt in das Absetzbecken sedimentieren. Das gereinigte Wasser strömt zunächst unter einer Tauchwand hindurch und anschließend über ein Wehr zum Abfluss.

Das Wehr auf der Ablaufseite ist höhenverstellbar und ermöglicht es, den Wasserstand im Absetzbecken zu verändern. Der Wasserstand über dem Zulaufwehr kann ebenfalls eingestellt werden. Dies beeinflusst die Strömungsgeschwindigkeit über dem Zulaufwehr.

In die Versuchsstrecke kann eine Lamelleneinheit eingesetzt werden. Dadurch wird der Einfluss von Lamellen auf den Trennprozess untersucht. Die Durchströmung der Lamellen erfolgt von unten nach oben. Oberhalb der Lamellen befindet sich eine Ablaufrinne. Die Seitenwände der Ablaufrinne sind als Zackenwehr ausgeführt.

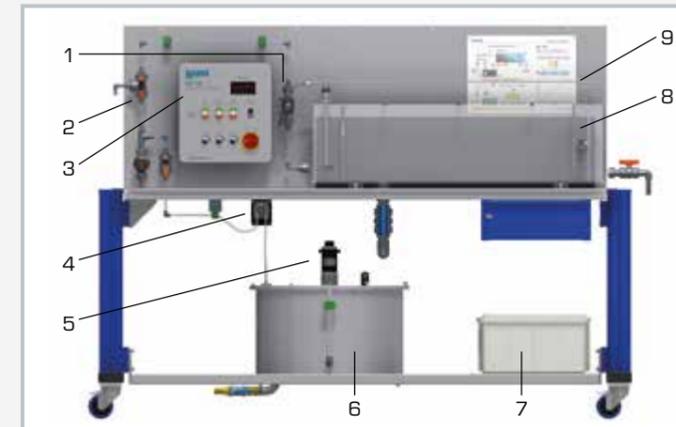
Die Durchflüsse der konzentrierten Suspension und des Frischwassers werden über Ventile eingestellt. Dadurch kann das Mischungsverhältnis und damit die Feststoffkonzentration im Einlauf des Absetzbeckens eingestellt werden. Ein magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer erfasst den Durchfluss im Zulauf des Absetzbeckens. Durchfluss und Drehzahl des Rührwerks werden digital angezeigt. Zur besseren Beobachtung der Strömungsverhältnisse ist das Absetzbecken mit einer Beleuchtung ausgestattet.

#### Lerninhalte / Übungen

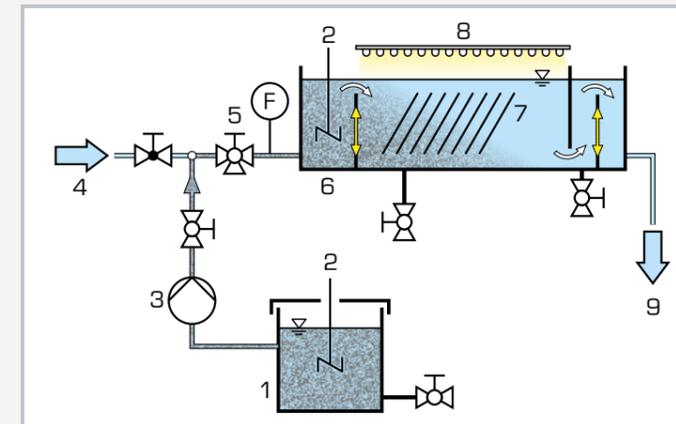
- Grundprinzip zur Abtrennung von Feststoffen aus Suspensionen in einem Absetzbecken
- Bestimmung der hydraulischen Oberflächenbelastung
- Einfluss folgender Parameter auf den Trennprozess:
  - ▶ Feststoffkonzentration
  - ▶ Durchfluss
  - ▶ Strömungsgeschwindigkeit im Einlauf
  - ▶ Wasserstand im Absetzbecken
- Untersuchung der Strömungsverhältnisse
- Einfluss von Lamellen auf den Sedimentationsprozess

## HM 142

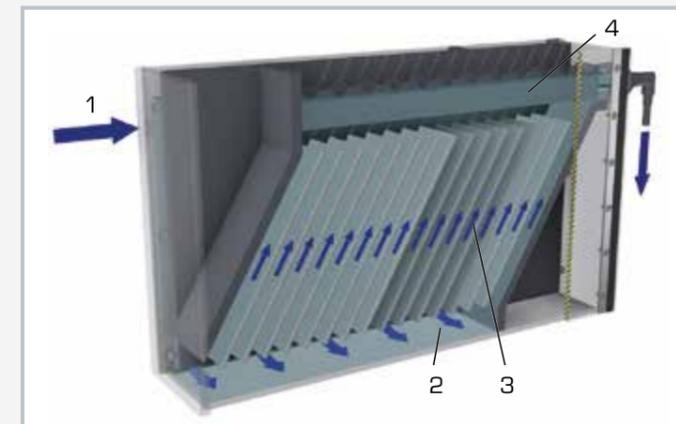
### Sedimentation in Absetzbecken



1 magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer, 2 Probenahmestelle, 3 Schaltkasten, 4 Pumpe, 5 Rührwerk, 6 Suspensionsbehälter, 7 Aufbewahrungskiste, 8 Absetzbecken, 9 Beleuchtung



1 Suspensionsbehälter, 2 Rührwerk, 3 Pumpe, 4 Frischwasser, 5 Probenahmestelle, 6 Absetzbecken, 7 Lamellen (optional), 8 Beleuchtung, 9 Ablauf, F Durchfluss



Funktionsprinzip Lamelleneinheit

1 Rohwassereintritt, 2 Rohwasser tritt unter der Trennwand durch, 3 Rohwasser strömt zwischen den Lamellen nach oben, Feststoffe sinken auf die Lamellen und rutschen auf den Lamellen nach unten, 4 gereinigtes Wasser strömt in die Ablaufrinne

#### Spezifikation

- [1] Trennung von Suspensionen durch Sedimentation im Absetzbecken
- [2] transparentes Absetzbecken mit Beleuchtung zur Visualisierung der Strömungsverhältnisse
- [3] Rührwerk im Eintrittsbereich des Absetzbeckens
- [4] Lamelleneinheit optional ins Absetzbecken einsetzbar
- [5] Behälter mit Pumpe und Rührwerk zum Herstellen und Fördern einer konzentrierten Suspension
- [6] Mischung der konzentrierten Suspension mit Frischwasser ergibt zu untersuchendes Rohwasser
- [7] Einstellung der Feststoffkonzentration über Ventile für Frischwasser- und Suspensionsdurchfluss
- [8] Wasserstand im Absetzbecken und Strömungsgeschwindigkeit im Einlauf einstellbar
- [9] magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer für Rohwasser
- [10] Imhoff-Trichter zur Bestimmung der absetzbaren Stoffe einer Wasserprobe

#### Technische Daten

Absetzbecken (Versuchsstrecke)

- LxBxH: ca. 900x110x300mm
- max. Füllvolumen: ca. 25L
- Material: Plexiglas

Lamelleneinheit

- Neigungswinkel der Lamellen: 60°
- Anzahl der Lamellen: 16

Suspensionsbehälter

- Volumen: ca. 85L
- Material: Edelstahl

Pumpe

- max. Förderstrom: 75L/h

Rührwerke (max. Drehzahl)

- Suspensionsbehälter: 600min<sup>-1</sup>
- Absetzbecken: 330min<sup>-1</sup>

Messbereiche

- Durchfluss: 30...600L/h

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 2200x790x1540mm

Gewicht: ca. 220kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Gebinde Feststoffe
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht

# CE 587 Druckentspannungsflotation

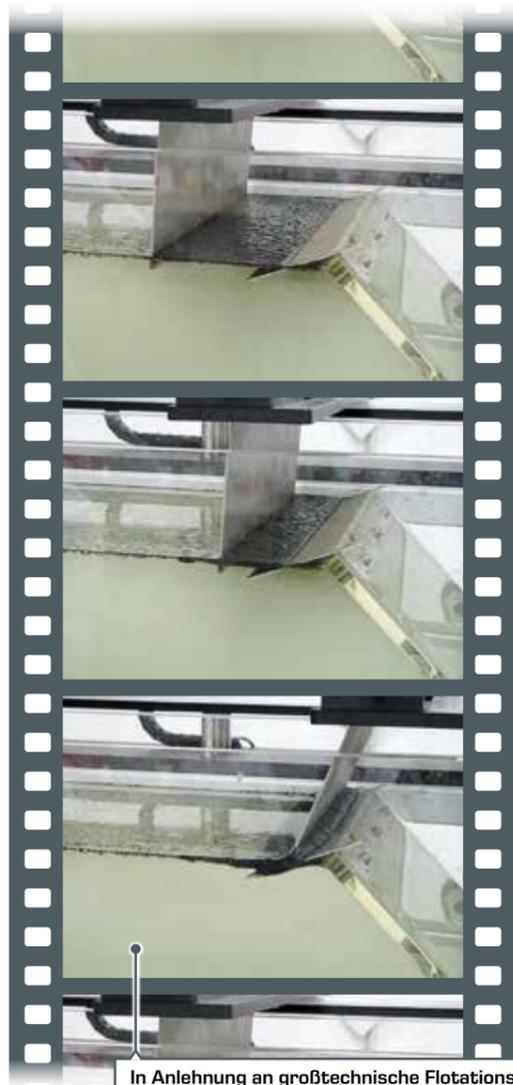
### Feststoffentfernung durch Auftrieb

Neben der Sedimentation stellt die Flotation ein weiteres bei der Wasserbehandlung oft eingesetztes Verfahren zur Entfernung von Feststoffen dar. Dabei ist die Druckentspannungsflotation das am häufigsten eingesetzte Flotationsverfahren.

### Versuche mit großem Praxisbezug

Mit unserem Lehrgerät CE 587 können Sie alle wesentlichen Aspekte dieses Verfahrens untersuchen. Um einen hohen Praxisbezug herzustellen, haben wir bei der Entwicklung dieses Gerätes großen Wert auf eine möglichst hohe Realitätsnähe gelegt.

Das Gerät besteht aus einer Versorgungseinheit und einem Versuchsstand. Zunächst erfolgt eine Vorbehandlung des Rohwassers durch Flockung. Anschließend werden die Flocken im Flotationsbecken mittels kleiner Luftblasen an die Wasseroberfläche befördert. Mit einem elektrisch angetriebenen Räumler können Sie die Wasseroberfläche von dem Flotat befreien. Viele der verwendeten Komponenten, wie z.B. magnetisch-induktive Durchflussaufnehmer und Dosierpumpen kommen auch in großtechnischen Anlagen zum Einsatz. Durch die Verwendung transparenter Materialien können Sie alle wichtigen Prozessschritte optimal beobachten.



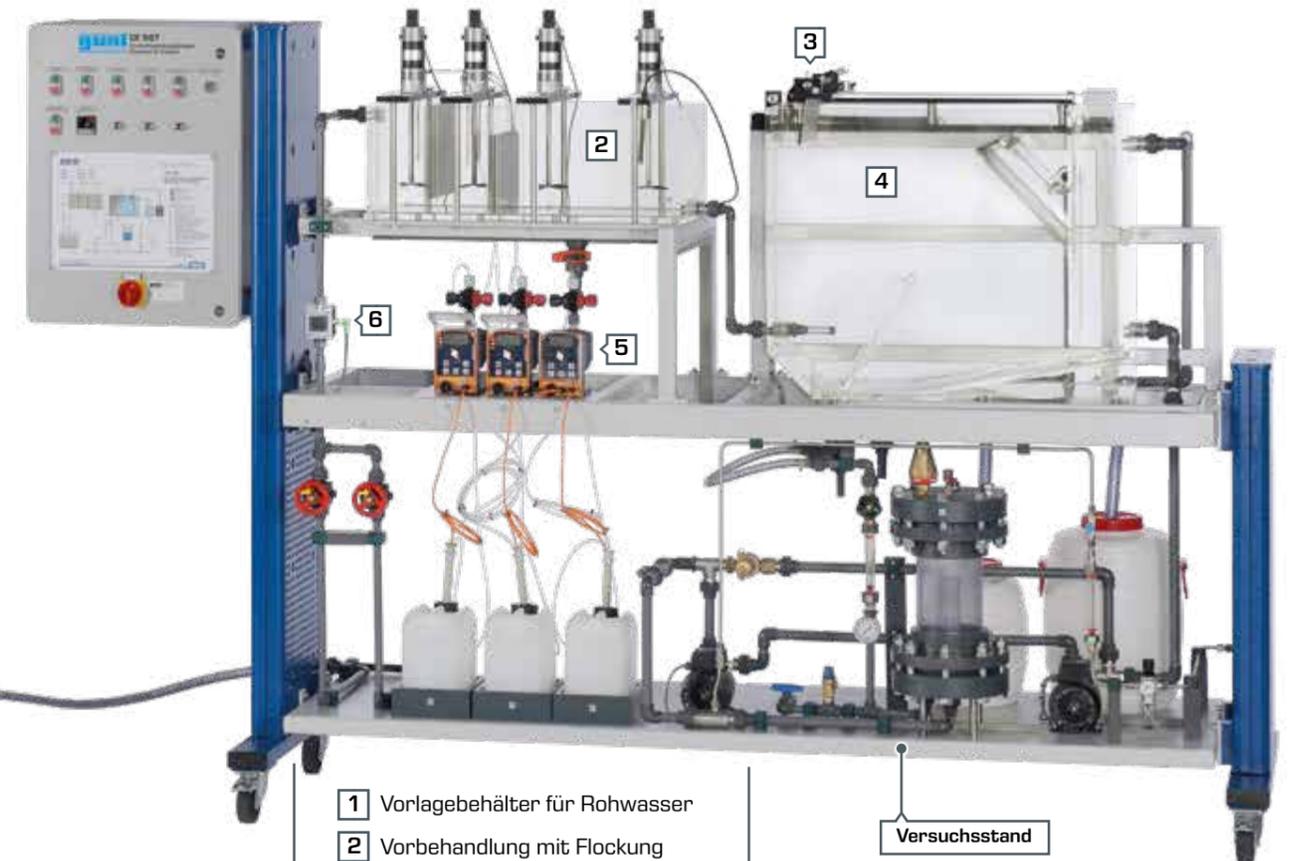
In Anlehnung an großtechnische Flotationsanlagen ist CE 587 mit einem elektrisch angetriebenen Räumler ausgestattet, der die flotierten Feststoffe von der Wasseroberfläche entfernt.



Versorgungseinheit



Standard bei GUNT: Einsatz hochwertiger, industrieller Komponenten, wie z.B. professionelle Dosierpumpen



- 1 Vorlagebehälter für Rohwasser
- 2 Vorbehandlung mit Flockung
- 3 elektrisch angetriebener Räumler
- 4 Flotationsbecken
- 5 Dosierpumpen
- 6 magnetisch-induktiver Durchflussmesser

Versuchsstand

### Lerninhalte

- Funktionsweise der Druckentspannungsflotation
- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- Einfluss der Flockungsmittelkonzentration
- Bestimmung der hydraulischen Oberflächenbelastung (Steiggeschwindigkeit)

Zum Produkt:



## CE 587

### Druckentspannungsflotation



Die Abbildung zeigt: Versorgungseinheit (links) und Versuchsstand (rechts)

#### Beschreibung

- **Demonstration der Druckentspannungsflotation**
- **Flockung zur Konditionierung des Rohwassers**
- **Räume zur Entfernung des Flotats**

CE 587 demonstriert die Reinigung eines feststoffhaltigen Rohwassers mit dem Verfahren der Druckentspannungsflotation.

In einem Behälter wird zunächst eine Suspension (Rohwasser) hergestellt. Von hier aus fließt das Rohwasser in ein Flockungsbecken, das in drei Kammern unterteilt ist. Durch Zugabe eines Flockungsmittels in der ersten Kammer werden die Abstoßungskräfte zwischen den Feststoffpartikeln aufgehoben. Die Feststoffpartikel fügen sich zu Flocken zusammen. Zur Erzeugung größerer Flocken wird in der zweiten Kammer ein Flockungshilfsmittel eingemischt. Das Flockungsmittel führt zu einem Absinken des pH-Wertes. Durch die Zugabe von Natronlauge kann der pH-Wert des Wassers wieder erhöht werden. In der anschließenden dritten Kammer des Flockungsbeckens liegen geringe Strömungsgeschwindigkeiten vor, so dass hier keine Turbulenz entsteht. Turbulenz würde die Flockenbildung behindern.

Vom Flockungsbecken gelangt das Rohwasser in das Flotationsbecken. Ein Teil des Reinwassers wird aus dem Flotationsbecken entnommen und unter Druck mit Luft gesättigt. Der Eintritt dieses Wassers (Zirkulationswasser) erfolgt über ein Entspannungsventil, so dass es sich schlagartig auf Atmosphärendruck entspannt. Dadurch entstehen sehr kleine Luftblasen, die sich an die Flocken an die Wasseroberfläche. Mit einem Räumler können die flotierten Flocken (Flotat) in eine Auffangrinne geschoben werden.

Durchflüsse, Drücke und pH-Wert werden erfasst. Zusätzlich kann der pH-Wert geregelt werden. Der Druck des Zirkulationswassers kann eingestellt werden.

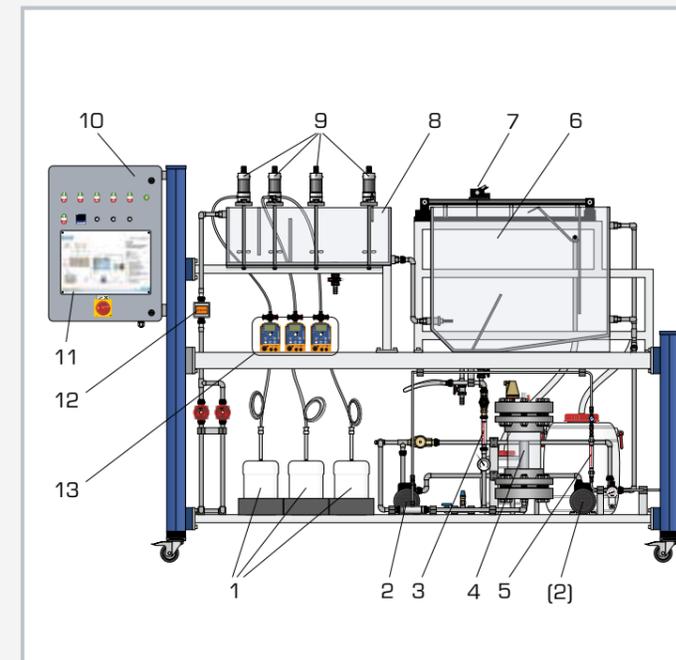
Als Flockungsmittel eignen sich grundsätzlich dreiwertige Metallsalze. Gängige Flockungshilfsmittel sind organische Polymere. Zur Herstellung des Rohwassers kann pulverförmige Aktivkohle verwendet werden.

#### Lerninhalte / Übungen

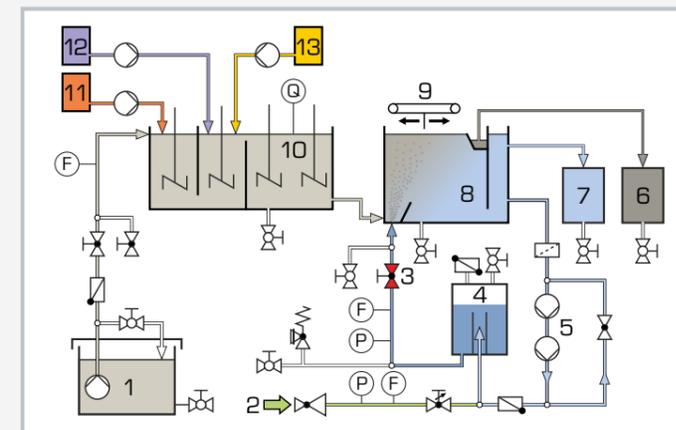
- Funktionsweise der Druckentspannungsflotation
- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- Einfluss unterschiedlicher Parameter
  - ▶ Konzentration des Flockungsmittels
  - ▶ Konzentration des Flockungshilfsmittels
- Bestimmung der hydraulischen Oberflächenbelastung (Steiggeschwindigkeit)

## CE 587

### Druckentspannungsflotation



1 Chemikalienbehälter, 2 Zirkulationspumpen, 3 Durchflussmesser (Zirkulationswasser), 4 Druckbehälter, 5 Durchflussmesser (Luft), 6 Flotationsbecken, 7 Räumler, 8 Flockungsbecken, 9 Rührwerke, 10 Schaltschrank, 11 Prozessschema, 12 magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer (Rohwasser), 13 Dosierpumpen



1 Rohwasser, 2 Druckluft, 3 Entspannungsventil, 4 Druckbehälter, 5 Zirkulationspumpen, 6 Schlamm (Flotat), 7 Reinwasser, 8 Flotationsbecken, 9 Räumler, 10 Flockungsbecken, 11 Flockungsmittel, 12 Flockungshilfsmittel, 13 Natronlauge; F Durchfluss, P Druck, Q pH-Wert

#### Spezifikation

- [1] Feststoffentfernung aus einem Rohwasser mit Druckentspannungsflotation
- [2] Konditionierung des Rohwassers durch Flockung
- [3] 3 Dosierpumpen für Chemikalien
- [4] Flockungsbecken mit 3 Kammern und 4 Rührwerken
- [5] Flotationsbecken mit elektrisch angetriebenen Räumler
- [6] Druckbehälter und 2 Zirkulationspumpen
- [7] Entspannungsventil
- [8] separate Versorgungseinheit mit Behälter und Pumpe für Rohwasser
- [9] magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer
- [10] Erfassung von Durchfluss, Druck und pH-Wert
- [11] Regelung des pH-Wertes

#### Technische Daten

##### Behälter

- Flotationsbecken: 150L
- Flockungsbecken: 45L
- Rohwasser: 300L
- Reinwasser: 80L
- Schlamm (Flotat): 15L

##### Rohwasserpumpe

- max. Förderstrom: 135L/min
- max. Förderhöhe: 7,0m

##### Zirkulationspumpen

- max. Förderstrom: je 18L/min
- max. Förderhöhe: je 50m

##### Dosierpumpen

- max. Förderstrom: je 2,3L/h

##### Rührwerke

- max. Drehzahl: je 600min<sup>-1</sup>

##### Messbereiche

- Durchfluss: 0,5...10L/min (Rohwasser)
- Durchfluss: 30...320L/h (Zirkulationswasser)
- Durchfluss: 20...360L/h (Luft)
- pH-Wert: 1...14
- Druck: 0...6bar (Zirkulationswasser)

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1560x790x1150mm (Versorgungseinheit)

LxBxH: 3100x790x1950mm (Versuchsstand)

Gesamtgewicht: ca. 550kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss, Druckluft, Natronlauge, Eisen(III)-sulfat, Flockungshilfsmittel, pulverförmige Aktivkohle (Empfehlung)

#### Lieferumfang

- 1 Versorgungseinheit
- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 588

### Demonstration der Druckentspannungsflotation



#### Lerninhalte / Übungen

- Funktionsweise der Druckentspannungsflotation
- Lösen von Gasen in Flüssigkeiten:
  - ▶ Gesetz von Henry
  - ▶ Gesetz von Dalton

2E

#### Beschreibung

- **mechanische Wasserbehandlung**
- **transparente Behälter zur Beobachtung der Prozesss**

Flotationsverfahren dienen dazu, Feststoffe aus einer Flüssigkeit (z.B. Wasser) abzutrennen. Das bei der Wasserbehandlung am häufigsten eingesetzte Flotationsverfahren ist die Druckentspannungsflotation.

Die zu reinigende Suspension (Rohwasser) wird in einem Behälter angesetzt. Um die Flotierbarkeit des Schmutzstoffe zu verbessern, können dem Rohwasser Flockungschemikalien zugegeben werden. Das Rohwasser wird mit einer Pumpe gefördert und tritt über eine vertikale Leitung in die Flotationssäule ein. Die Zulaufleitung lässt sich in der Höhe verstellen.

An die Flotationssäule ist ein Wasserkreislauf mit einer Pumpe angeschlossen. An der höchsten Stelle des Kreislaufs herrscht Unterdruck. Die für die Flotation erforderliche Luft wird durch Öffnen eines Ventils an dieser Stelle eingesaugt. Unter Druck löst sich die Luft in dem Wasser. Ein Teil des Wassers fließt über einen Bypass wieder zurück zur Pumpe.

Der andere Teil des Wassers gelangt in einen Druckbehälter, der mit Pall-Ringen gefüllt ist. Der Druckbehälter gewährleistet eine ausreichend hohe Verweildauer zum Lösen der Luft und die Abtrennung nicht gelöster Luft. Anschließend tritt das Wasser über ein Ventil von unten in die Flotationssäule ein. Dies führt zu einem plötzlichen Druckabfall auf nahezu atmosphärischen Druck.

Da die Löslichkeit von Luft mit zunehmenden Druck ansteigt, perlt die überschüssige Luft in Form kleiner Blasen aus. Die Luftblasen lagern sich an die Schmutzstoffe an. Die Schmutzstoffe steigen zusammen mit den Luftblasen in der Säule nach oben. Am oberen Ende der Flotationssäule gelangen die Schmutzstoffe in eine umlaufende Rinne. Das gereinigte Wasser wird am Boden der Flotationssäule entnommen und in einem Behälter gesammelt.

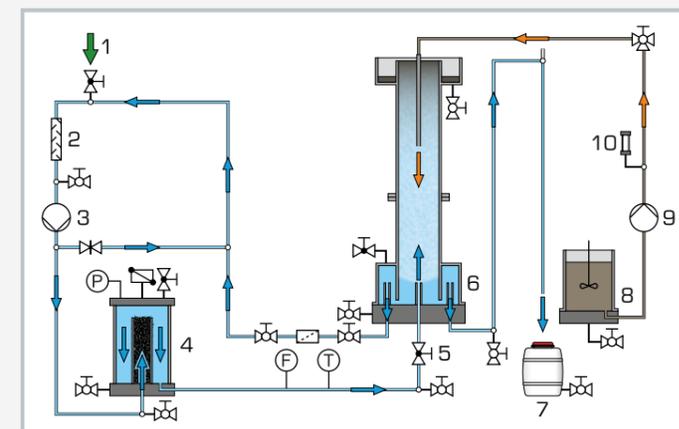
Der Druck und der Durchfluss im Kreislauf können eingestellt werden. Durchfluss, Temperatur und Druck werden gemessen und angezeigt.

## CE 588

### Demonstration der Druckentspannungsflotation



1 Bedienelemente, 2 Manometer, 3 Druckbehälter, 4 Zirkulationspumpe, 5 Reinwasserbehälter, 6 Entspannungsventil, 7 Rohwasserbehälter, 8 Rohwasserpumpe, 9 Rührwerk, 10 Flotationssäule



1 Luft, 2 statischer Mischer, 3 Zirkulationspumpe, 4 Druckbehälter, 5 Entspannungsventil, 6 Flotationssäule, 7 Reinwasserbehälter, 8 Rohwasserbehälter, 9 Rohwasserpumpe, 10 Pulsationsdämpfer; F Durchfluss, P Druck, T Temperatur

#### Spezifikation

- [1] Flotationssäule aus Plexiglas
- [2] Rohwasserbehälter mit Rührwerk
- [3] Schlauchpumpe zur Förderung des Rohwassers
- [4] Pulsationsdämpfer für gleichmäßige Rohwasserströmung
- [5] Drehzahlen der Schlauchpumpe und des Rührwerkes stufenlos einstellbar
- [6] Eintritt des Rohwassers in die Flotationssäule höhenverstellbar
- [7] Druck und Durchfluss des Kreislaufs einstellbar
- [8] Wasserkreislauf mit Pumpe und Bypass
- [9] keine Druckluft erforderlich
- [10] transparenter Druckbehälter mit Pall-Ringen
- [11] Erfassung von Durchfluss, Druck und Temperatur

#### Technische Daten

Flotationssäule  
 ■ Innendurchmesser: 115mm  
 ■ Höhe: 870mm  
 ■ Volumen: ca. 10L

Behälter  
 ■ Rohwasser: 8L  
 ■ Reinwasser: 15L  
 ■ Druckbehälter: 1,5L

Rohwasserpumpe (Schlauchpumpe)  
 ■ max. Förderstrom: 20L/h  
 ■ max. Drehzahl: 200min<sup>-1</sup>

Zirkulationspumpe (Kreiselpumpe)  
 ■ max. Förderstrom: 660L/h  
 ■ max. Förderhöhe: 65m

Rührwerk: max. 330min<sup>-1</sup>

Messbereiche  
 ■ Durchfluss: 5...60L/h  
 ■ Druck: 0...10bar  
 ■ Temperatur: 0...60°C

230V, 50Hz, 1 Phase  
 230V, 60Hz, 1 Phase  
 120V, 60Hz, 1 Phase  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1410x790x1850mm  
 Gewicht: ca. 170kg

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 2 Messbecher
- 1 Nusschalengranulat
- 1 Eisen(III)-chlorid
- 1 Flockungshilfsmittel
- 1 Aufbewahrungskiste
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

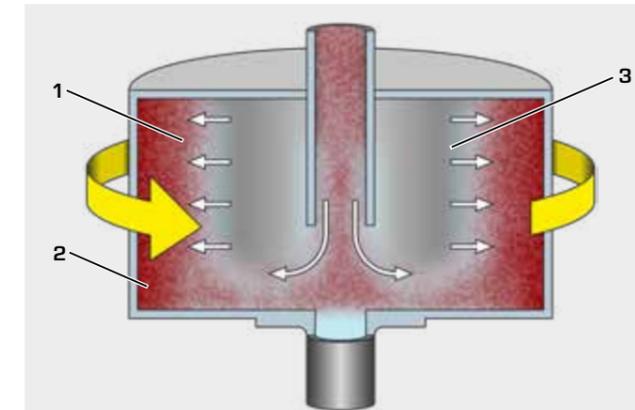


Besuchen Sie  
unsere Website

Auf unserer Website finden Sie alle Informationen  
rund um unser Programm.

## Basiswissen

# Trennung im Fliehkraftfeld



Sedimentationszentrifuge:

1 Feststoffpartikel, 2 Sediment, 3 Flüssigkeit

Zur Trennung von Fest-Flüssig-Gemischen können Sedimentations- und Filterzentrifugen eingesetzt werden:

Bei **Sedimentationszentrifugen** sammeln sich die Feststoffpartikel als Sediment an der Mantelwand an. Sie können auch mit Einbauten, wie z.B. schräg zum Fliehkraftfeld geeigneten Flächen (Tellerzentrifuge) ausgestattet sein. Durch diese Anordnung werden Absetzweg und -zeit verkürzt. Tellerzentrifugen können auch zur Trennung von Emulsionen wie Wasser und Öl eingesetzt werden.

Bei **Zyklonen** wird die zur Trennung notwendige Fliehkraft durch die Strömungsführung des Fluids erreicht. Sie sind im oberen Bereich zylinderförmig und verjüngen sich nach unten hin kegelförmig.

Das mit Feststoff beladene Fluid strömt im oberen Bereich tangential ein und wird durch die Zyklonwand auf eine Kreisbahn gezwungen. Es entsteht ein rotierender (Primär-) Wirbel, der sich abwärts bewegt. Am Fuß des Zyklons findet eine Umkehr des Primärwirbels statt. Als Sekundärwirbel bewegt sich das Fluid im Zentrum des Zyklons in Richtung Tauchrohr aufwärts, um ihn dort zu verlassen. Der hauptsächliche Trennprozess findet im Primärwirbel statt. Aufgrund der Fliehkraft und des Dichteunterschieds zwischen Fluid und Feststoff bewegen sich die Feststoffpartikel in Richtung Wand.

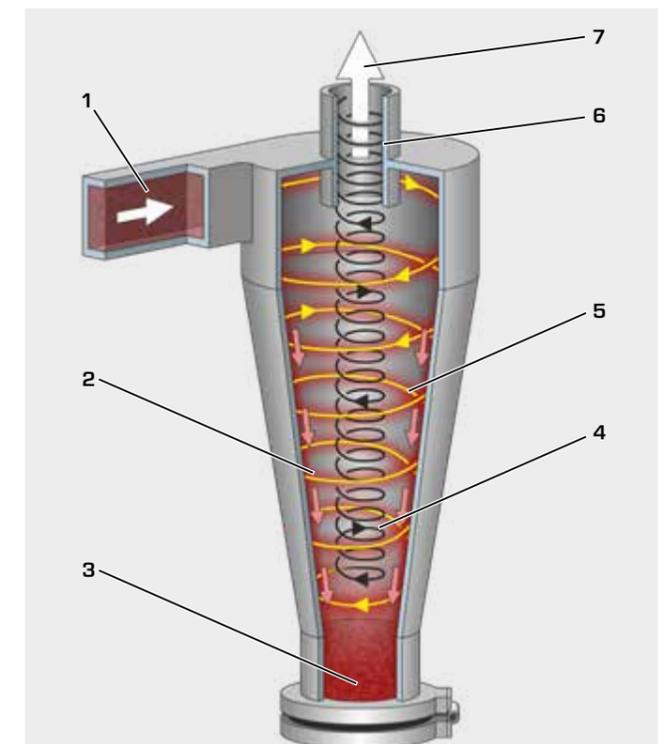
Beim **Gaszyklon** rutschen die Feststoffpartikel abwärts und werden dort gesammelt. Gaszyklone sind weit verbreitet, weil mit ihnen auch die Abscheidung von Feststoffen aus heißen Gasen möglich ist.

Beim **Hydrozyklon** bewegt sich der mit Feststoff angereicherte Teil der Flüssigkeit in Wandnähe spiralförmig nach unten und wird dort im Gegensatz zum Gaszyklon kontinuierlich abgeführt. Hydrozyklone werden z.B. zur Reinigung von kontaminierten Böden eingesetzt.

Als Triebkraft für Phasentrennprozesse kann neben der Schwerkraft auch die Fliehkraft genutzt werden. Die Fliehkraft kann durch die Strömungsführung des Fluids oder durch rotierende Behälter (Zentrifugen) erzeugt werden. Der Dichteunterschied zwischen Fluid und Feststoffpartikel sorgt für die Trennung. Die Feststoffpartikel mit der größeren Dichte werden von der Fliehkraft stärker nach außen gezogen als die Fluidpartikel.

Die im Fliehkraftfeld einer Zentrifuge auftretenden Kräfte können ein Vielfaches der Schwerkraft betragen. Es lassen sich deshalb kleinere, spezifisch leichtere Partikel aus einem Fluid abtrennen als im Schwerkraftfeld.

Bei **Filterzentrifugen** ist der Mantel des rotierenden Behälters mit Löchern versehen. Auf der Innenseite des Mantels ist ein Filtermittel (feines Sieb oder Filtertuch) angebracht. Durch die Fliehkraft wird die Suspension in Richtung des Filtermittels bewegt. Die Feststoffpartikel bilden dort einen Filterkuchen.



Gaszyklon:

1 Rohgas, 2 abgeschiedener Staub, 3 gesammelter Staub, 4 Sekundärwirbel, 5 Primärwirbel 6 Tauchrohr, 7 entstaubtes Gas



## CE 282

### Tellerzentrifuge



#### Beschreibung

- kontinuierliches Trennen von Emulsionen
- Übungen zum Thema **Wartung und Inspektion** möglich
- praxisgerechte Versuche im **Labormaßstab**

Die Tellerzentrifuge dient zum Trennen einer Emulsion in mehrere Phasen: leichtere Flüssigkeiten wie Öl, schwerere Flüssigkeiten wie Wasser und Feststoffe.

In einem Rührbehälter wird die zu trennende Emulsion angesetzt. Als Emulsion wird Wasser/Öl empfohlen. Ein Rührwerk mit Drehzahlregelung sorgt für die Mischung der beiden flüssigen Phasen. Im weiteren Verlauf des Rührprozesses werden die Öltröpfchen immer feiner in dem Wasser zerteilt. Bei kleineren Tropfengrößen bleibt die Emulsion längere Zeit stabil.

Eine Pumpe fördert die Emulsion oben in das Zentrum der rotierenden Zentrifuge. Über den Verteilerboden gelangt die Emulsion über Steigkanäle in die Tellerzwischenräume. Triebkraft für den Trennprozess ist die Fliehkraft. Sie sorgt dafür, dass die spezifisch schwereren Flüssigkeitspartikel (Wasser) stärker nach außen gezogen werden als die spezifisch leichteren Flüssigkeitspartikel (Öl).

Absetzweg und Absetzzeit sind durch die schräg zum Beschleunigungsfeld angeordneten Teller verkürzt. Auf der Unterseite der rotierenden Teller gleitet der spezifisch schwerere Teil der Emulsion nach unten und außen. Der leichtere Teil strömt auf der Oberseite der Teller nach innen. Die getrennten Flüssigkeiten verlassen die Zentrifuge über Abflüsse und können in Behältern gesammelt werden.

Die Drehzahl der Zentrifuge ist über ein Potentiometer einstellbar. Mit einem Ventil wird der Durchfluss der zu trennenden Emulsion eingestellt. Für das Rührwerk stehen unterschiedliche Rührertypen zur Verfügung. Zur Analyse der getrennten Fraktionen wird ein Fotometer empfohlen.

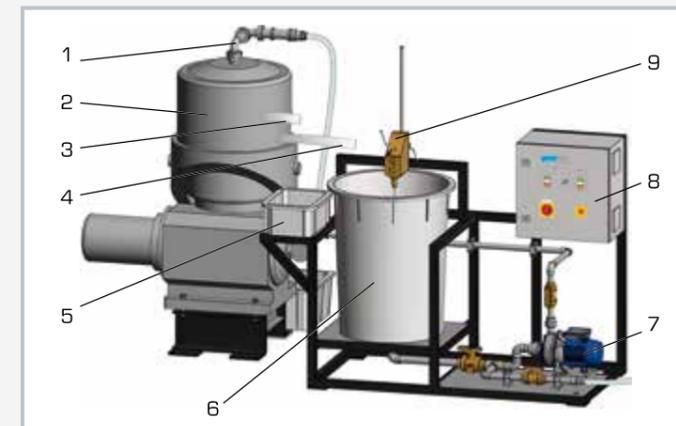
Die Betriebs- und Serviceanleitung ist die Grundlage für das Erlernen von umfangreichen Wartungs- und Inspektionsarbeiten an der Zentrifuge.

#### Lerninhalte / Übungen

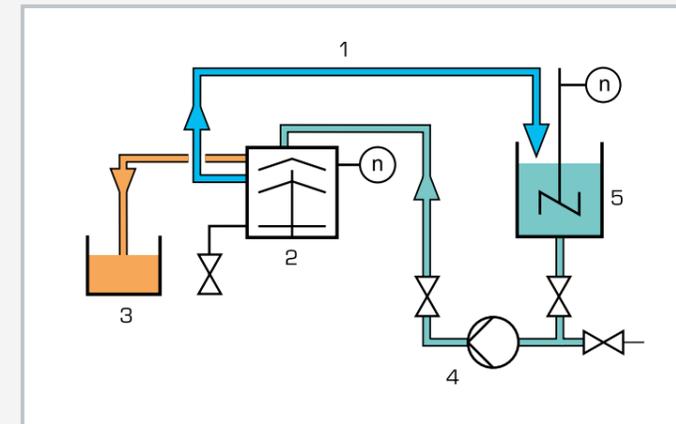
- Herstellung stabiler Emulsionen mit unterschiedlichen Rührertypen
- Grundprinzip von Tellerzentrifugen kennenlernen
- Einfluss von Drehzahl und Durchfluss im Zulauf auf das Trennergebnis
- Konzentrationsverlauf der leichten Phase im Rührbehälter über die Zeit (mit Fotometer)
- An-/Abfahrvorgänge und Betrieb einer Tellerzentrifuge
- Wartungsarbeiten
- Reinigungsarbeiten
- Inspektionsarbeiten

## CE 282

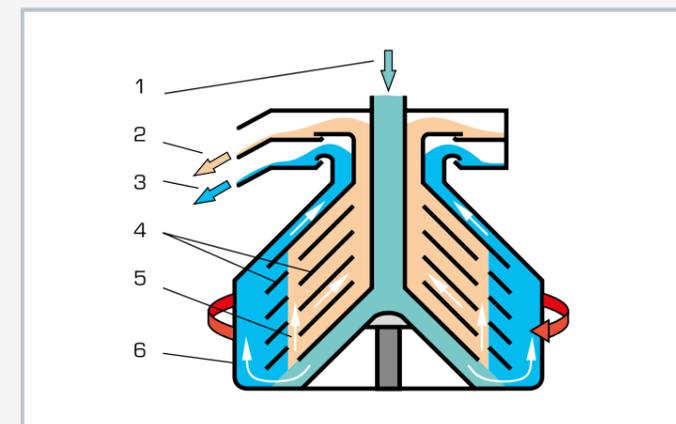
### Tellerzentrifuge



1 Zulauf Emulsion, 2 Zentrifuge, 3 Ablauf leichte Phase, 4 Ablauf schwere Phase, 5 Auffangbehälter leichte Phase, 6 Rührbehälter, 7 Pumpe, 8 Schaltkasten mit Bedienelementen, 9 Rührwerk



1 schwere Phase, 2 Tellerzentrifuge, 3 leichte Phase, 4 Pumpe, 5 Rührbehälter Emulsion; n Drehzahl



Grundprinzip von Tellerzentrifugen: 1 Zulauf Emulsion, 2 Ablauf leichte Phase, 3 Ablauf schwere Phase, 4 Teller, 5 Steigkanal, 6 Trommel

#### Spezifikation

- [1] kontinuierliche Trennung von Emulsionen mit einer Tellerzentrifuge
- [2] Behälter aus HDPE mit Rührwerk zur Herstellung einer Emulsion
- [3] Kreiselpumpe fördert die Emulsion zur Zentrifuge
- [4] Einstellung des Durchflusses der geförderten Emulsion mit Ventil
- [5] Drehzahl der Zentrifuge über Potentiometer einstellbar
- [6] drehzahlgeregeltes Rührwerk mit digitaler Drehmomentanzeige
- [7] 3 auswechselbare Rührer
- [8] Auffangbehälter für abgetrennte Phase

#### Technische Daten

Tellerzentrifuge

- Leistung: 7500W
- max. Nutzdurchmesser: ca. 300mm
- max. Drehzahl: 6480min<sup>-1</sup>

Rührwerk

- Leistungsaufnahme: 140W
- Drehzahl: 30...1000min<sup>-1</sup>

Rührer

- 2x Flächenrührer: 3/10 Löcher
- 1x Rührer mit 3 Flügeln

Kreiselpumpe

- max. Förderstrom: 183L/min
- max. Förderhöhe: 11m

Behälter

- Rührbehälter: 200L
- Auffangbehälter: 14L

Messbereiche

- Drehzahl:
  - ▶ 1x 0...8000min<sup>-1</sup>
  - ▶ 1x 30...1000min<sup>-1</sup>

400V, 50Hz, 3 Phasen

400V, 60Hz, 3 Phasen; 230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 2800x1300x1800mm

Gewicht: ca. 1100kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss: 200...300L/h, Abfluss; 5L Speiseöl, spezielles Fundament erforderlich

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 235

### Gaszyklon



Die Abbildung zeigt: Versuchsstand (links) und Gebläse (rechts).

#### Beschreibung

- **Feststoffabscheidung mit einem Gaszyklon**
- **transparenter Zyklon zur Beobachtung des Trennprozesses**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

Ein Einsatzgebiet von Gaszyklonen ist die Vorabscheidung von Feststoffen aus Gasen. Gaszyklone besitzen keine bewegten Teile und sind deshalb wartungsarm. Sie können auch bei hohen Gastemperaturen verwendet werden. Aus diesen Gründen sind sie weit verbreitet.

Dieser Versuchsstand ist in Zusammenarbeit mit dem **Institut für Feststoffverfahrenstechnik und Partikeltechnologie der TU Hamburg-Harburg** entwickelt worden. Mit einer Dispergiereinrichtung wird das Aufgabegut (empfohlen wird Quarzmehl) fein in einem Luftstrom verteilt. Der so mit Feststoff beladene Luftstrom (Rohgas) wird am oberen Teil tangential in den Zyklon geleitet. Im Zyklon bewegt sich der Luftstrom als rotierender Primärwirbel abwärts. Am Fuß des Zyklons findet eine Umkehr des Wirbels statt. Er bewegt sich als Sekundärwirbel im Zentrum des Zyklons in Richtung des Tauchrohrs wieder aufwärts. Dort verlässt das gereinigte Gas den Zyklon. Der hauptsächliche Trennprozess findet im Primärwirbel statt.

Aufgrund der Fliehkräfte und des Dichteunterschieds zwischen Luft und Feststoff bewegen sich die groben Feststoffpartikel in Richtung Wand. Sie rutschen an der Wand abwärts und werden in einem Behälter am Fuß des Zyklons gesammelt. Eine vollständige Abtrennung des gesamten Feststoffs erfolgt nicht. Die feinen Partikel, die kleiner als die Trennkorngröße sind, werden im Idealfall mit dem Sekundärwirbel aus dem Tauchrohr oben ausgetragen. Dieses Feingut wird mit einem Filter aus dem Luftstrom abgetrennt. Die Trennkorngröße definiert die theoretische Grenze zwischen Fein- und Grobgut.

Der Feststoffgehalt des Rohgases kann mit Hilfe der Dispergiereinrichtung und einem Ventil für den Volumenstrom der Luft eingestellt werden. Um eine Beladung des Luftstroms mit Partikeln vor der Dispergiereinrichtung zu vermeiden, wird die angesogene Raumluft gefiltert. Ein Gebläse erzeugt den Luftstrom. Druckmesspunkte an den relevanten Positionen des Versuchsstands erlauben die Ermittlung von Druckverlusten.

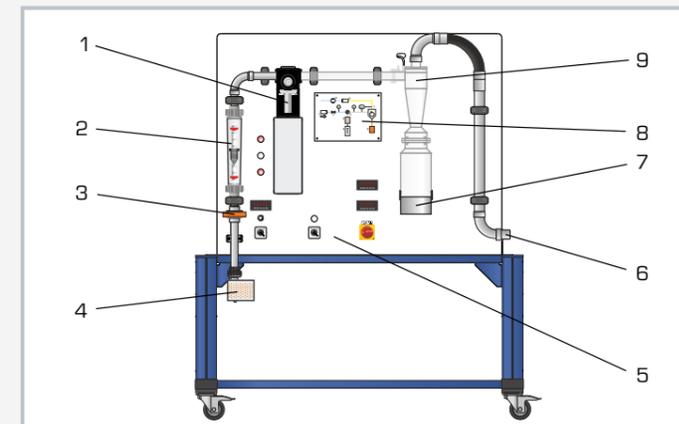
Mit einer geeigneten Analyseeinrichtung (z.B. Beugungsspektrometer) kann eine Trenngradkurve erstellt und die Trennkorngröße bestimmt werden.

#### Lerninhalte / Übungen

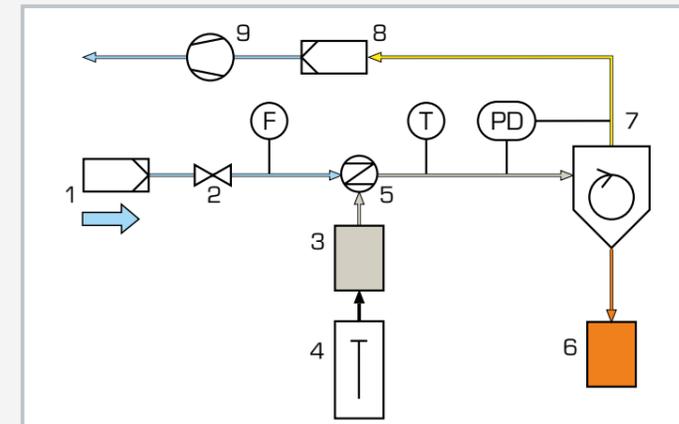
- Einfluss des Feststoffgehalts und des Volumenstroms der Luft auf
  - ▶ Druckverlust am Zyklon
  - ▶ Abscheidegrad
  - ▶ Trenngradkurve und Trennkorngröße (mit geeigneter Analyseeinrichtung)
- Vergleich von Druckverlust und Abscheidegrad mit theoretisch berechneten Werten

## CE 235

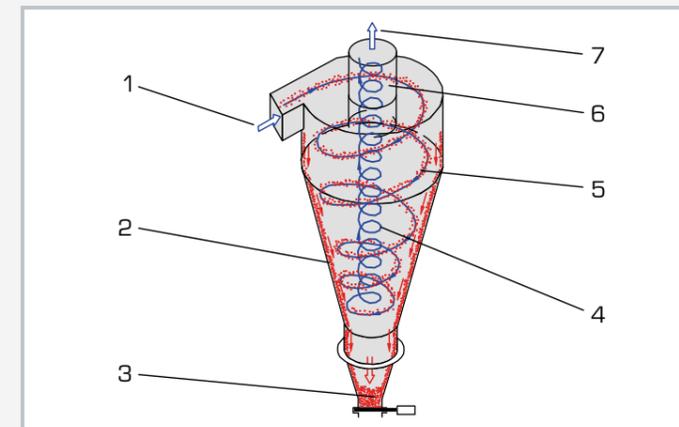
### Gaszyklon



1 Dispergiereinrichtung mit Behälter für Aufgabegut und Fördereinheit, 2 Durchflussmesser, 3 Ventil Volumenstrom Luft, 4 Lufteintritt mit Filter, 5 Anzeige- und Bedienelemente, 6 Anschluss Gebläse, 7 Behälter Grobgut, 8 Prozessschema, 9 Gaszyklon



1 Lufteintritt mit Filter, 2 Ventil Volumenstrom Luft, 3 Behälter Aufgabegut, 4 Fördereinheit, 5 Dispergiereinrichtung, 6 Behälter Grobgut, 7 Gaszyklon, 8 Filter Feingut, 9 Gebläse; F Volumenstrom, PD Differenzdruck, T Temperatur



Strömungsverhältnisse in einem Gaszyklon: 1 Eintritt Rohgas, 2 abgeschiedener Feststoff, 3 gesammelter Feststoff, 4 Sekundärwirbel, 5 Primärwirbel, 6 Tauchrohr, 7 gereinigtes Gas

#### Spezifikation

- [1] Feststoffabscheidung aus Gasen mit einem Zyklon
- [2] Zyklon mit Tangentialeinlauf
- [3] Zudosierung des Aufgabeguts in den Luftstrom mit Dispergiereinrichtung
- [4] Erzeugung des Luftstroms mit Gebläse; Einstellung mit Ventil
- [5] Behälter für Aufgabegut und Grobgut
- [6] 1 Filter am Lufteintritt und 1 Filter für Feingut am Luftaustritt
- [7] Erfassung von Differenzdruck, Volumenstrom der Luft und Temperatur

#### Technische Daten

- Zyklon- Höhe: ca. 250mm
- Durchmesser: ca. 80mm
  - Tauchrohrdurchmesser: ca. 30mm

- Gebläse
- Volumenstrom: max. 600m<sup>3</sup>/h
  - Leistung: ca. 3600W

- Behälter
- Aufgabegut: 15mL
  - Grobgut: 700mL

- Messbereiche
- Differenzdruck: 0...100mbar
  - Volumenstrom: 10...100m<sup>3</sup>/h (Luft)
  - Temperatur: 0...60°C

230V, 50Hz, 1 Phase  
 230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1520x790x1800mm (Versuchsstand)  
 Gewicht: ca. 160kg (Versuchsstand)  
 LxBxH: 660x510x880mm (Gebläse)  
 Gewicht: ca. 33kg (Gebläse)

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Gebläse
- 1 Gebinde Quarzmehl (0...0,16mm; 25kg)
- 1 Befüllungshilfe für Dispergiereinrichtung
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

**CE 225**  
Hydrozyklon**Lerninhalte / Übungen**

- Grundprinzip und Betriebsverhalten eines Hydrozyklons
- Feststoffmassenströme in Zulauf, Oberlauf und Unterlauf
- Flüssigkeitsvolumenströme in Zulauf, Oberlauf und Unterlauf
- Kenngrößen für die Güte der Trennung
- Druckverlust am Zyklon in Abhängigkeit des Durchflusses im Zulauf
- Einfluss der Feststoffdichte auf die Kenngrößen und den Druckverlust

2E

**Beschreibung**

- **Feststoffabscheidung mit einem Hydrozyklon**
- **optimale Beobachtung der Prozesse durch transparente Materialien**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

Mit Hydrozyklonen können in Flüssigkeiten suspendierte Feststoffe abgetrennt werden. Bei CE 225 wird die Suspension in einem Behälter angesetzt. Eine Pumpe fördert die Suspension in den tangentialen Einlauf des Zyklons. Im Zyklon bildet sich ein abwärts gerichteter Primärwirbel. Durch die nach unten hin kegelförmige Verjüngung wird der Wirbel zur Umkehr gezwungen. Er bewegt sich im Zentrum als Sekundärwirbel in Richtung des Tauchrohrs wieder aufwärts. Dort verlässt die vom Grobgut befreite Suspension den Zyklon.

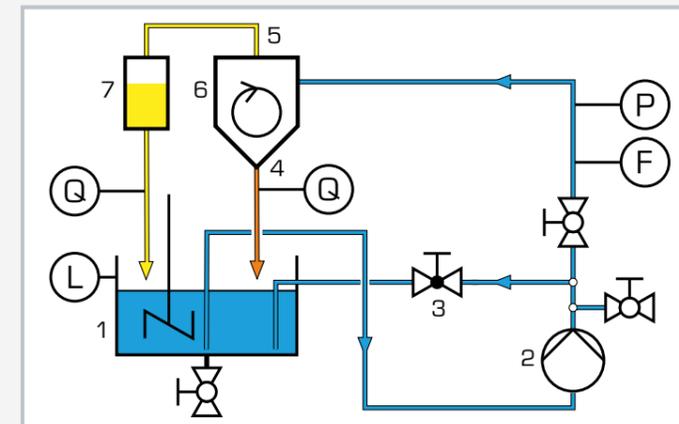
Im Innern des Zyklons bildet sich ein Luftkern aus. Durch die Fliehkräfte reichern sich die größeren Feststoffpartikel im Primärwirbel an. Sie werden mit dem Unterlauf an der Apexdüse ausgetragen. Im Oberlauf wird überwiegend das Feingut ausgetragen.

Der Durchfluss im Zulauf wird über ein Ventil im Bypass eingestellt und mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser bestimmt. An Unter- und Oberlauf sind Probenahmestellen vorgesehen. Mit einem Eimer und einer Stoppuhr können dort die Volumenströme bestimmt werden. Zur Bestimmung der Feststoffkonzentrationen werden eine Waage und ein Trockenschrank empfohlen. Mit einer geeigneten Analyseeinrichtung (z.B. Beugungsspektrometer) kann eine Trenngradkurve erstellt und die Trennkorngröße bestimmt werden. Als Feststoff werden Quarzmehl und Kieselgur empfohlen.

Der Versuchstand wurde in Zusammenarbeit mit dem **Fachbereich Mechanische Verfahrenstechnik der Hochschule Anhalt** entwickelt.

**CE 225**  
Hydrozyklon

1 Behälter zur Beobachtung des Oberlaufs, 2 Rührwerk, 3 Rührbehälter, 4 Probenahmestelle Oberlauf, 5 Füllstandsanzeige, 6 Probenahmestelle Unterlauf, 7 Pumpe, 8 Ventil im Bypass, 9 Hydrozyklon, 10 Durchflussmesser, 11 Schaltkasten, 12 Manometer



1 Rührbehälter, 2 Pumpe, 3 Ventil im Bypass, 4 Unterlauf, 5 Oberlauf, 6 Hydrozyklon, 7 Behälter zur Beobachtung des Oberlaufs; F Durchflussmesser, P Manometer, L Füllstandsanzeige, Q Probenahmestelle

**Spezifikation**

- [1] Feststoffabscheidung aus Flüssigkeiten mit einem Hydrozyklon
- [2] Hydrozyklon mit tangentialen Einlauf
- [3] Rührbehälter zum Herstellen der Suspension
- [4] Kreiselpumpe zur Förderung der Suspension
- [5] Einstellung des Durchflusses über Bypass mit Ventil
- [6] magnetisch-induktiver Durchflussmesser im Zulauf
- [7] Probenahmestellen an Ober- und Unterlauf zur Bestimmung der Feststoffkonzentrationen und Durchflüsse
- [8] Manometer zur Bestimmung des Druckverlusts am Zyklon

**Technische Daten**

Zyklon  
 ■ Höhe: 710mm  
 ■ Ø: 114mm  
 ■ Tauchrohr: Ø 40mm

Rührbehälter  
 ■ Volumen: 200L  
 ■ Material: Edelstahl

Behälter Oberlauf  
 ■ Volumen: 5L  
 ■ Material: PMMA

Pumpe  
 ■ max. Förderstrom: 400L/min  
 ■ max. Förderhöhe: 30m

Messbereiche  
 Druck: 0...4bar  
 Durchfluss: 0...200L/min

400V, 50Hz, 3 Phasen  
 400V, 60Hz, 3 Phasen  
 230V, 60Hz, 3 Phasen  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1500x1000x2020mm  
 Gewicht: ca. 370kg

**Lieferumfang**

- 1 Versuchstand
- 7 Apexdüsen
- 1 Schlauch
- 2 Eimer
- 1 Messbecher
- 1 Schaufel
- 1 Stoppuhr
- 1 Satz Werkzeuge
- 1 Gebinde Quarzmehl (25kg)
- 1 Gebinde Kieselgur (20kg)
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen Filtration

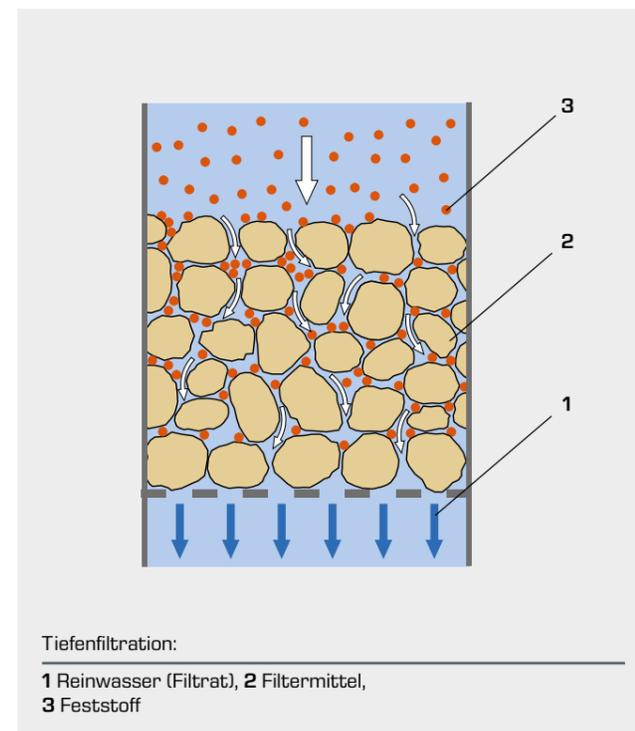
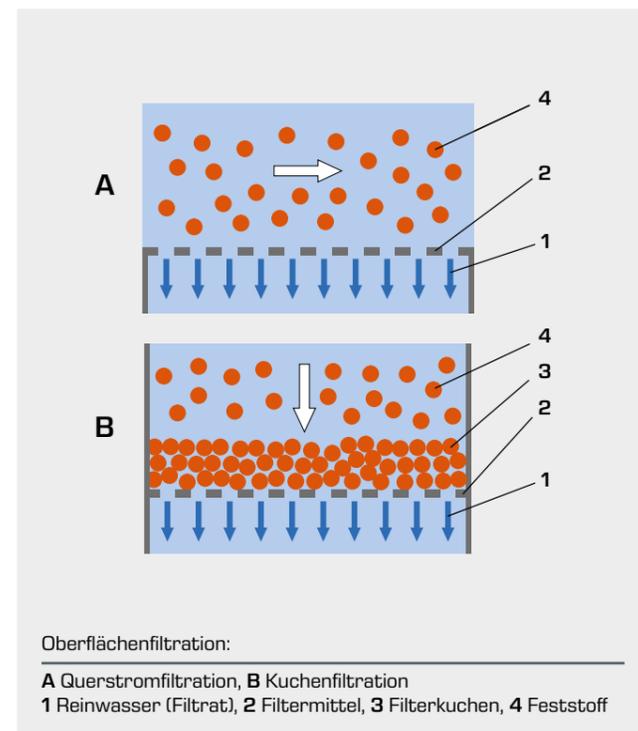
Die Filtration dient der Entfernung von Feststoffen. Das Grundprinzip beruht darauf, dass die Feststoffe von einem Filtermittel zurückgehalten werden. Die flüssige Phase des Rohwassers passiert das Filtermittel und wird als Filtrat bezeichnet.

### Oberflächenfiltration

Die Oberflächenfiltration beruht auf einem Siebeffekt. Die Feststoffe dringen nicht in das Filtermittel ein, sondern werden an seiner Oberfläche zurückgehalten. Voraussetzung dafür ist, dass die Porenweite des Filtermittels kleiner ist als die Größe der Feststoffpartikel. Filtermittel können Siebe, Tücher, Filterpapier oder Membranen sein. Wird die Oberfläche senkrecht angeströmt, spricht man von Kuchenfiltration. Nachteilig hierbei ist, dass sich auf dem Filtermittel im Laufe der Zeit ein Filterkuchen

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Tiefenfiltration und Oberflächenfiltration.

bildet, der den Filtratfluss verringert. Diesem Problem begegnet man bei der Querstromfiltration dadurch, dass das Rohwasser parallel zur Oberfläche strömt. Ablagerungen auf dem Filtermittel werden so größtenteils durch die Strömung entfernt. Dieses Prinzip wird vor allem bei den Membrantrennverfahren angewandt.



### Tiefenfiltration

Bei der Tiefenfiltration durchströmt das Rohwasser ein aufgeschüttetes Filtermittel (Filterbett). Sehr oft eingesetzte Filtermittel sind Sand und Kies. Das Rohwasser strömt durch die Zwischenräume des Filterbettes, wobei die Feststoffe hier zurückgehalten werden. Das gereinigte Wasser hingegen passiert das Filterbett. Mit zunehmender Zeit lagern sich immer mehr Feststoffe in den Zwischenräumen des Filterbettes ab. Dies führt zu einer Verkleinerung des durchströmabaren Querschnittes. Infolge dessen steigt der Widerstand, den der Filter der Strömung entgegen setzt, an. Dieser Widerstand äußert sich als Druckverlust. Der Durchfluss durch den Filter nimmt ab

bzw. kann nur durch eine Erhöhung des Druckes auf der Zulaufseite des Filters aufrechterhalten werden. Durch eine Rückspülung lassen sich die abgelagerten Feststoffe wieder entfernen. Folglich nimmt der Druckverlust durch eine Rückspülung ab.

Üblicherweise erfolgt dieser Vorgang mit gereinigtem Wasser (Reinwasser) in entgegengesetzter Fließrichtung. Die zeitliche Entwicklung der Druckverhältnisse in einem Filterbett lassen sich anhand von Filterwiderstandsdiagrammen, auch Mischeau-Diagramme genannt, veranschaulichen.

## CE 116 Kuchen- und Tiefenfiltration



### Beschreibung

#### ■ Kuchen- und Tiefenfiltration mit unterschiedlichen Suspensionen und Filtermittelschichten

Mit CE 116 können die Prozesse bei der Tiefenfiltration und der Kuchenfiltration beobachtet und untersucht werden. Die Suspension (Wasser und Kieselgur als Feststoff) fließt vom Einfülltrichter oben in das Filterelement. Dort werden die Feststoffe abgetrennt.

Das Filtrat fließt durch einen Durchflussmesser in den Abfluss. Das Filterelement ist unten mit einem porösen Filtermittel ausgestattet. Bei der Kuchenfiltration dient das Filtermittel als Grundlage für den Aufbau des Filterkuchens. Bei der Tiefenfiltration stützt das Filtermittel die Schüttung (Filtermittelschicht; Kies). Ein Zwei-Rohr-Manometer misst den Druckverlust über dem Filterelement.

Zur Erfassung des Filtratvolumens wird die Waage CE 116.01 empfohlen.

### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen der Filtration: Gleichung von Darcy
- Tiefenfiltration mit unterschiedlichen Schüttungen und Suspensionen
- Kuchenfiltration mit unterschiedlichen Suspensionen
- Bestimmung von Filtrationskennwerten

### Spezifikation

- [1] Grundlagen der Kuchen- und Tiefenfiltration
- [2] Filterelement mit gesintertem Filtermittel am Boden zur Aufnahme der Partikel
- [3] Druckverlustmessung mit 2-Rohr-Manometer
- [4] höhenverstellbarer Einfülltrichter aus DURAN-Glas
- [5] Durchflussmesser mit Nadelventil zur Einstellung

### Technische Daten

#### Filterelement

- Filterraumhöhe: 85mm
- Ø, innen: ca. 37mm
- Querschnittsfläche: ca. 11 cm<sup>2</sup>
- Rohrmaterial: DURAN-Glas

#### Filtermittel, Sinterfilter SIKA 100

- Porengröße: 100µm
- Stärke: 2mm
- Material: Sintermetall

#### Messbereiche

- Durchfluss: 40...360mL/min
- Druck: 2x 0...500mmWS
- Temperatur: -10...100°C
- Messbecher
  - ▶ 1x 1000mL, Teilung: 10mL
  - ▶ 1x 100mL, Teilung: 2mL

LxBxH: 450x410x1040mm  
Gewicht: ca. 13kg

### Für den Betrieb erforderlich

#### Abfluss

### Lieferumfang

- 1 Versuchsgesetz
- 2 Messbecher
- 1 Stoppuhr
- 1 Thermometer
- 1 Sand (1kg; 1...2mm)
- 1 Gebinde Kieselgur (2kg)
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 117

### Durchströmung von Partikelschichten



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen zur Durchströmung von Schütt- und Wirbelschichten (Darcy) kennenlernen
- Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten
- Beobachtung des Fluidisierungsprozesses
- Druckverluste abhängig von Durchfluss, Art, Partikelgröße und Höhe der Schüttung
- Bestimmung der Lockerungsgeschwindigkeit und Vergleich mit theoretisch errechneten Werten
- Überprüfung der Carman-Kozeny-Gleichung

#### Beschreibung

- **strömungsmechanische Grundlagenversuche an Partikelschichten**
- **Durchströmung von Schütt-schichten (Festbett)**
- **Durchströmung von Wirbelschichten (Fließbett)**
- **Druckverluste in Schütt-schicht und Wirbelschicht**

Die Durchströmung von Partikelschichten ist in der Verfahrenstechnik weit verbreitet. In Reaktoren werden Schütt- und Wirbelschichten von Flüssigkeiten und Gasen durchströmt. Das Abtrennen von Feststoffen aus Suspensionen durch Kuchen- und Tiefenfiltration ist ein weiteres Anwendungsgebiet.

Mit CE 117 können die strömungsmechanischen Grundlagen der Durchströmung von Schütt- und Wirbelschichten untersucht werden.

Dazu steht ein befüllbarer Testbehälter aus Glas zur Verfügung, der beidseitig mit Wasser durchströmt werden kann. Eine Sinterplatte dient als Boden für Schüttungen.

Vom Wasseranschluss des Labors fließt Wasser zum Testbehälter. Zur Untersuchung der Durchströmung von Schütt-schichten tritt das Wasser von oben in den Testbehälter. Es durchströmt die Schütt-schicht und die Sinterplatte und fließt über einen Verteiler zum Ablauf.

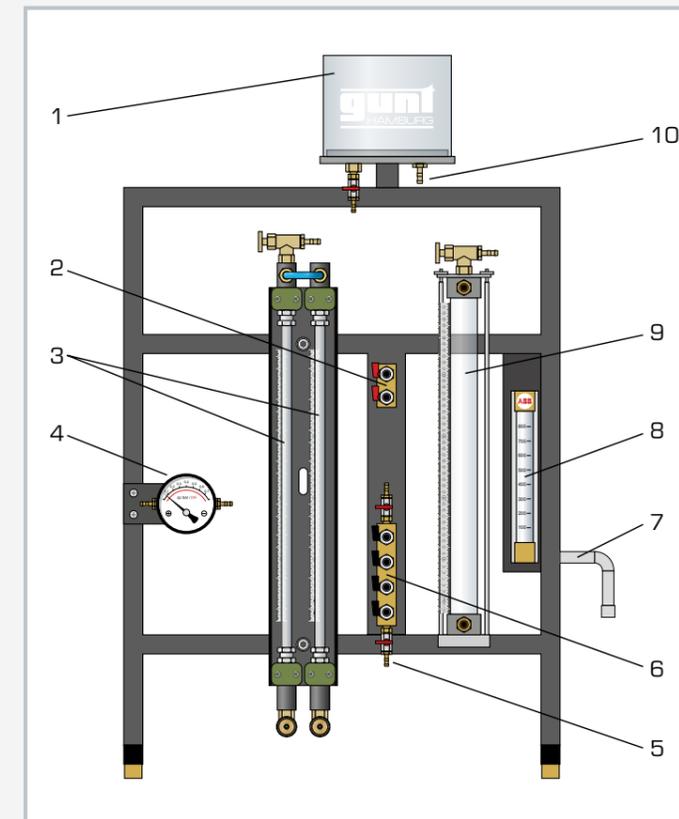
Der Versuchsaufbau kann mit Hilfe leicht lösbarer Schnellkupplungen verändert werden. Auf diese Weise ist es auch möglich, den Testbehälter in der Gegenrichtung zu durchströmen und Wirbelschichten zu untersuchen. Das Wasser strömt durch die poröse Sinterplatte und die Schütt-schicht aufwärts.

Ist die Geschwindigkeit des Wassers geringer als die sogenannte Lockerungsgeschwindigkeit, wird die Schüttung lediglich durchströmt. Bei größeren Geschwindigkeiten bildet sich eine Wirbelschicht. Das Wasser strömt vom Kopf des Testbehälters in einen Ausgleichbehälter. Von dort fließt es in den Ablauf.

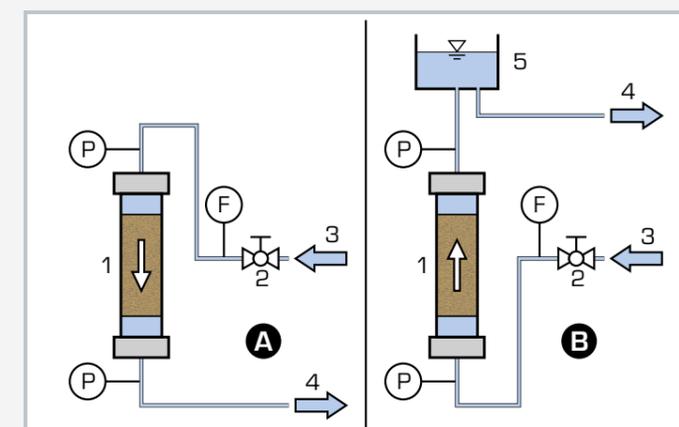
Unabhängig vom jeweiligen Aufbau wird der Durchfluss mit einem Ventil eingestellt und an einem Durchflussmesser angezeigt. Zur Bestimmung des Druckverlusts über die Schütt- oder Wirbelschicht stehen zwei Manometer mit unterschiedlichen Messbereichen zur Verfügung. Die Auswahl des gewünschten Manometers erfolgt über Ventile.

## CE 117

### Durchströmung von Partikelschichten



1 Ausgleichsbehälter, 2 Verteiler Zufluss, 3 Rohrmanometer, 4 Manometer, 5 Ablauf, 6 Verteiler für Druckmessung, 7 Zulauf, 8 Durchflussmesser, 9 Testbehälter, 10 Ablauf



Prozessschema zur Untersuchung von Schütt-schichten (A) bzw. Wirbelschichten (B): 1 Testbehälter (Partikelschicht), 2 Ventil Durchfluss, 3 Zulauf, 4 Ablauf, 5 Ausgleichsbehälter; P Druck, F Durchfluss

#### Spezifikation

- [1] Untersuchung der Eigenschaften von flüssigkeitsdurchströmten Schütt- und Wirbelschichten
- [2] Testbehälter aus Glas mit gesinterter Filtermittel am Boden
- [3] Testbehälter zur Befüllung herausnehmbar
- [4] abwärtsgerichtete Durchströmung zur Untersuchung von Schütt-schichten
- [5] aufwärtsgerichtete Durchströmung zur Untersuchung von Wirbelschichten
- [6] Durchflussmesser mit Ventil zur Einstellung
- [7] 2 Manometer mit verschiedenen Messbereichen zur Bestimmung von Druckverlusten über den Testbehälter
- [8] Stahlmaßstab zur Messung der Höhe der Schütt- oder Wirbelschicht

#### Technische Daten

##### Testbehälter

- Länge: 510mm
- Innendurchmesser: ca. 37mm
- Material: DURAN-Glas

##### Filtermittel

- Stärke: 2mm
- Material: Sintermetall

##### Ausgleichsbehälter

- Volumen: ca. 4500mL
- Material: PVC

##### Messbereiche

- Durchfluss: 82...820mL/min
- Differenzdruck:
  - ▶ 2x 0...500mmWS
  - ▶ 1x 0...250mbar
- Höhe: 10...500mm

LxBxH: 690x410x1150mm  
Gewicht: ca. 26kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss: ca. 1L/min  
Abfluss

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsgesetz
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (420...590µm; 1kg)
- 1 Gebinde Sand (1...2mm; 0,5kg)
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (180...300µm; 0,5kg)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 287 Rahmenfilterpresse



### Beschreibung

- **Abtrennung von Feststoffen aus Suspensionen mit einer Rahmenfilterpresse**
- **diskontinuierliche Kuchenfiltration**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

Rahmenfilterpressen werden z.B. in der Getränkeindustrie zur Klärung von Zwischenprodukten eingesetzt.

Eine Suspension aus Kieselgur und Wasser (empfohlen) wird in einem Behälter angesetzt. Eine Pumpe sorgt dafür, dass der Feststoff in Schwebelage bleibt und sich nicht absetzt. Die Pumpe fördert die Suspension in die einzelnen Trennräume der Rahmenfilterpresse. Ein Trennraum wird von einem Filterrahmen und zwei Filterplatten gebildet. Die Filterplatten sind mit Rillen versehen und mit Filtertüchern bespannt. Das Filtrat tritt durch das Filtertuch und fließt über die Rillen der Platten in eine Sammelleitung. Über die Sammelleitung verlässt das Filtrat die Rahmenfilterpresse und wird im Filtratbehälter gesammelt. Der Feststoff wird am Filtertuch abgeschieden und bildet dort einen wachsenden Filterkuchen. Mit wachsender Dicke des Filterkuchens wächst auch dessen Durchströmungswiderstand.

Wenn der Trennraum gefüllt ist oder eine maximale Druckdifferenz erreicht ist, wird der Filtrationsprozess beendet. Die Platten und Rahmen der Rahmenfilterpresse werden auseinandergezogen. Der Filterkuchen kann entfernt werden. Für den nächsten Filtrationsprozess müssen Platten und Rahmen wieder zusammen geschoben werden. Mit einer Spindel werden sie aneinander gepresst. Die Presskräfte sorgen dafür, dass die Suspension nicht an den Kontaktstellen der Platten und Rahmen austritt, sondern durch das Filtertuch gedrückt wird.

Der Durchfluss durch die Rahmenfilterpresse wird mit einem Ventil eingestellt. Der bei der Filtration auftretende Druck wird an einem Manometer angezeigt. Der Filtratbehälter ist skaliert. Mit einer Stoppuhr ist es so möglich, den Durchfluss zu bestimmen. Ein im Lieferumfang enthaltenes Trübungsmessgerät ermöglicht die Bestimmung der Feststoffkonzentration im Filtrat. Für die Auswertung der Versuche wird ein Trockenschrank empfohlen.

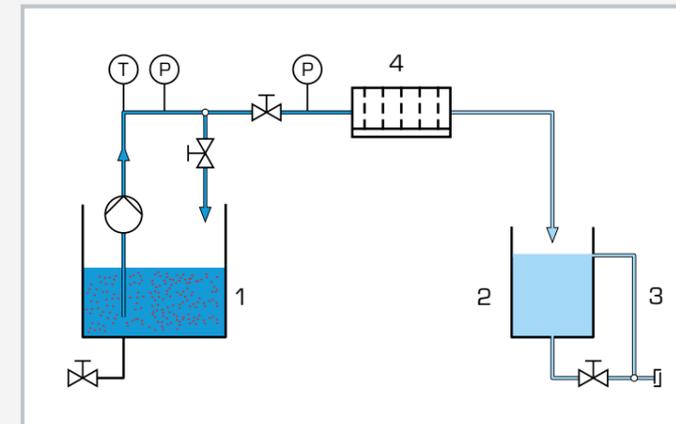
### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip und Betriebsverhalten einer Rahmenfilterpresse kennenlernen
- Herstellung einer Suspension
- Entfernung des Filterkuchens
- Filtertuch einlegen
- Grundlagen der Kuchenfiltration
  - ▶ Gleichung von Darcy
- Zeitverläufe des Filtratvolumens und der Feststoffkonzentration im Filtrat
- Masse des Filterkuchens in Abhängigkeit des Filtratvolumens

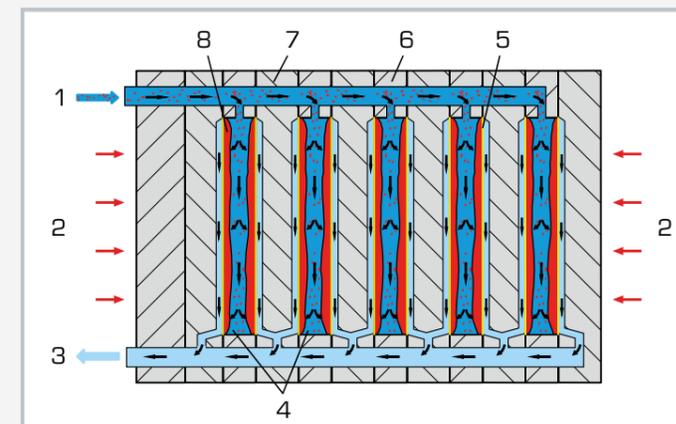
## CE 287 Rahmenfilterpresse



1 Schaltkasten mit Bedienelementen, 2 Behälter Suspension, 3 Ablauf und Überlauf Filtratbehälter, 4 Behälter Filtrat, 5 Spindel, 6 Rahmenfilterpresse



1 Behälter mit Pumpe, 2 Filtratbehälter, 3 Überlauf, 4 Rahmenfilterpresse; T Temperatur, P Druck



Grundprinzip einer Rahmenfilterpresse: 1 Zulauf Suspension, 2 Presskräfte, 3 Ablauf Filtrat, 4 Trennräume, 5 Filtertuch, 6 Filterrahmen, 7 Filterplatte, 8 Filterkuchen

### Spezifikation

- [1] Rahmenfilterpresse zur diskontinuierlichen Kuchenfiltration
- [2] Behälter aus HDPE zur Herstellung einer Suspension
- [3] Kreiselpumpe zur Förderung der Suspension zur Rahmenfilterpresse
- [4] Rahmenfilterpresse mit 10 zu öffnenden Trennräumen zur Filterkuchenentnahme
- [5] Behälter mit Füllstandsskala aus PMMA für das Filtrat
- [6] Einstellung des Durchflusses der geförderten Suspension mit Ventil
- [7] Thermometer und Manometer im Zulauf
- [8] batteriebetriebenes Trübungsmessgerät zur Bestimmung der Feststoffkonzentration im Filtrat

### Technische Daten

Rahmenfilterpresse  
 ■ Filterfläche: ca. 0,72m<sup>2</sup>  
 ■ Arbeitsdruck: ca. 0,4...2,5bar

Kreiselpumpe (Tauchpumpe)  
 ■ max. Förderstrom: 4,5m<sup>3</sup>/h  
 ■ max. Förderhöhe: 45m

Behälter  
 ■ Suspensionsbehälter: 200L  
 ■ Filtrat: 20L

Messbereiche  
 ■ Druck: 0...4bar  
 ■ Temperatur: 0...60°C  
 ■ Trübungsgrad: 0...50,0NTU

230V, 50Hz, 1 Phase  
 230V, 60Hz, 1 Phase  
 120V, 60Hz, 1 Phase  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1900x800x1900mm  
 Gewicht: ca. 208kg

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Trübungsmessgerät
- 1 Gebinde Kieselgur (20kg)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 283 Trommelzellenfilter



### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip und Betriebsverhalten eines Trommelzellenfilters kennenlernen
- Grundlagen der Kuchenfiltration
- Zeitverläufe von Filtratvolumen, Masse und Dicke des Filterkuchens
- Masse und Dicke des Filterkuchens in Abhängigkeit von Filtratvolumen, Unterdruck und Drehzahl der Trommel

### Beschreibung

- **Abtrennung von Feststoffen aus Suspensionen**
- **kontinuierliche Abnahme des Filterkuchens**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

Mit Trommelzellenfiltern können Feststoffe kontinuierlich aus Suspensionen abgetrennt werden.

Mit dem Suspensionsbereiter wird eine Suspension aus Kieselgur und Wasser hergestellt. Eine Pumpe fördert die Suspension in den Suspensionsbehälter des Trommelzellenfilters. Ein Rührer hält die Feststoffpartikel in der Suspension in Schwebe. Ein Teil der rotierenden Trommel taucht in die Suspension ein. Die Mantelfläche der Trommel ist perforiert und mit einem Filtertuch bespannt. Die Trommel ist in Zellen eingeteilt. Jede Zelle ist über eine Hohlwelle mit einer

Vakuuleitung verbunden. Durch das Vakuum wird Filtrat durch das Filtertuch in die Trommel gesogen. Von dort wird es in einen Sammelbehälter geführt, der unter Vakuum steht. Der Feststoff wird am Filtertuch abgeschieden. Im eintauchenden Bereich der Trommel entsteht deshalb ein in Drehrichtung wachsender Filterkuchen.

Nachdem der Filterkuchen durch die Drehbewegung aus der Suspension auftaucht, wird er durch das anliegende Vakuum entwässert. Ein Schaber schält den Filterkuchen von der Trommel ab, bevor diese wieder in die Suspension eintaucht. Zur Entfernung des Filterkuchens kann auch Druckluft eingesetzt werden. Der Filterkuchen fällt in einen Sammelbehälter.

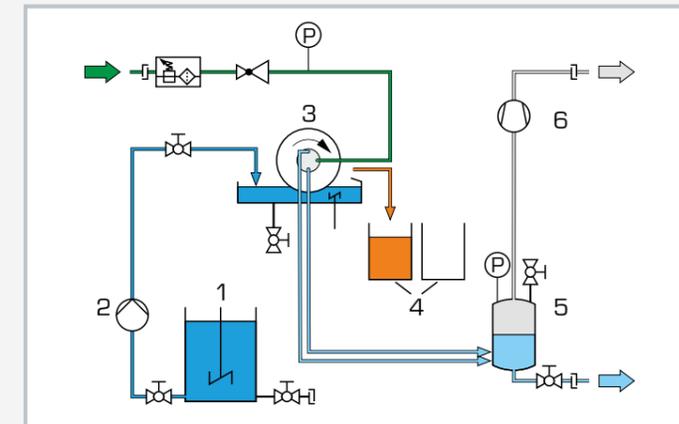
Der Durchfluss der zugeführten Suspension wird durch die Drehzahl der Suspensionspumpe eingestellt. Die Füllstandshöhe im Suspensionsbehälter des Trommelzellenfilters wird mit einem verstellbaren Überlauf eingestellt. Der anliegende Unterdruck wird mit einem Manometer am Vakuumbehälter angezeigt. Die Drehzahl der Trommel ist stufenlos einstellbar.

Zum Betreiben des Versuchsstands ist ein Druckluftanschluss erforderlich.

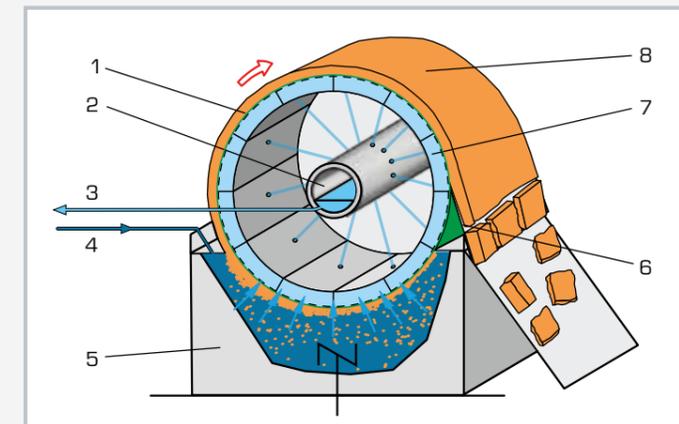
## CE 283 Trommelzellenfilter



1 Auffangbehälter Filterkuchen, 2 Waage, 3 Suspensionsvorratsbehälter, 4 Vakuumbehälter Filtrat, 5 Überlauf/Ablauf, 6 Trommelzellenfilter, 7 Vakuumsversorgung, 8 Rührwerk



1 Suspensionsvorratsbehälter, 2 Suspensionspumpe, 3 Trommelzellenfilter, 4 Auffangbehälter Filterkuchen, 5 Vakuumbehälter Filtrat, 6 Sauggebläse; P Druck; hellblau: Filtrat, dunkelblau: Suspension, orange: Filterkuchen, grau: Vakuum, grün: Druckluft



Grundprinzip eines Trommelzellenfilters: 1 perforierte Trommel mit Filtertuch, 2 Hohlwelle, 3 Vakuum (Filtrat), 4 Suspensionszulauf, 5 Suspensionsbehälter, 6 Filterkuchenabnahme, 7 Zelle, 8 Filterkuchen

### Spezifikation

- [1] kontinuierliche Kuchenfiltration von Suspensionen mit einem Trommelzellenfilter
- [2] teilweise in Suspension eintauchende, rotierende, perforierte Trommel mit Filtertuch
- [3] Vakuum im Innern der Trommel zum Absaugen des Filtrats und zur Trocknung des Filterkuchens
- [4] kontinuierliche Abnahme des Filterkuchens mit einstellbarem Schaber oder Druckluft
- [5] Trommeldrehzahl stufenlos einstellbar
- [6] Vakuumbehälter aus Kunststoff zum Sammeln des Filtrats
- [7] Suspensionsbehälter mit Schwenkrührwerk und Überlauf
- [8] Auffangbehälter aus Kunststoff für Filterkuchen
- [9] Herstellung und Förderung der Suspension im integrierten Suspensionsbereiter
- [10] Schlauchpumpe als Suspensionspumpe

### Technische Daten

- Trommelzellenfilter
- Filterfläche: ca. 0,1m<sup>2</sup>
  - Drehzahl: ca. 0,1...2min<sup>-1</sup>
  - Leistungsaufnahme Motor: ca. 200W
- Schwenkrührwerk
- Drehzahl: ca. 15min<sup>-1</sup>
  - Leistungsaufnahme Motor: ca. 200W
- Suspensionspumpe
- max. Förderleistung: 160L/h
  - max. Förderdruck: 6bar
- Behälter
- Vakuumbehälter Filtrat: ca. 30L
  - 2 Auffangbehälter Filterkuchen: ca. 5L
  - Suspensionsbehälter: ca. 5,5L, max. 10bar
  - Suspensionsvorratsbehälter: ca. 200L
- Rührwerk im Suspensionsvorratsbehälter
- Drehzahl: ca. 600min<sup>-1</sup>
  - Leistungsaufnahme: 40W

- Messbereiche
- Druck: 0...1bar (Druckluft)
  - Vakuum: -1...0bar

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 2180x790x1900mm  
Gewicht: ca. 285g

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss  
Druckluft: 3000L/h, min. 0,3bar

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 284 Saugnutsche



### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip und Betriebsverhalten einer Saugnutsche
- Grundlagen der Kuchenfiltration: Gleichung von Darcy
- Masse und Dicke des Filterkuchens in Abhängigkeit des Filtratvolumens

### Spezifikation

- [1] Saugnutsche zur diskontinuierlichen Kuchenfiltration
- [2] offener zweiteiliger Nutschenbehälter mit Flansch und eingelassenem Siebboden
- [3] Unterteil zum Ansaugen und Sammeln des Filtrats
- [4] Oberteil mit eingelegtem Filterbeutel zur Bildung des Filterkuchens
- [5] Filterbeutel aus Polyester
- [6] Manometer zur Anzeige des Unterdrucks im Unterteil
- [7] 2 Schaugläser zur Beobachtung des Füllstands im Unterteil
- [8] Herstellung und Förderung der Suspension mit dem Suspensionsbereiter CE 285

### Technische Daten

- Nutschenbehälter
- Innendurchmesser: ca. 300mm
  - Volumen: ca. 55L
  - zulässiger Druck: -1bar
  - Material: Edelstahl

- Manometer
- Ø 160mm

- Messbereiche
- Druck: -1...0bar

LxBxH: 600x900x1900mm  
Gewicht: ca. 100kg

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss; Vakuumanschluss (200L/min, 200mbar abs.)

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

### Beschreibung

#### ■ Kuchenfiltration mit einer Saugnutsche

Nutschen werden zur diskontinuierlichen Kuchenfiltration von Suspensionen mit großen Feststoffkonzentrationen eingesetzt. Mit dem Suspensionsbereiter CE 285 wird eine Suspension aus Kieselgur und Wasser hergestellt und von oben in die Nutsche gefördert. Dort ist ein Filterbeutel eingelegt. Im Filterbeutel bildet sich aus dem abgetrennten Feststoff ein wachsender Filterkuchen. Durch das Vakuum im Unterteil der Nutsche wird Filtrat durch den Filterbeutel und den Filterkuchen gesogen und dort gesammelt.

Nach dem Filtrationsprozess wird der gewonnene Filterkuchen mit einer Waschflüssigkeit (Wasser) gewaschen und vor der Entnahme durch das anliegende Vakuum getrocknet.

## CE 286 Drucknutsche



### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip und Betriebsverhalten einer Drucknutsche
- Grundlagen der Kuchenfiltration: Gleichung von Darcy
- Masse und Dicke des Filterkuchens in Abhängigkeit des Filtratvolumens

### Spezifikation

- [1] Drucknutsche zur diskontinuierlichen Kuchenfiltration
- [2] geschlossener dreiteiliger Nutschenbehälter mit 2 Flanschen und 2 Klöpperböden
- [3] Unterer Flansch mit eingelassenem Siebboden und Filtertuch aus PP
- [4] unterer Behälterteil zum Sammeln des Filtrats
- [5] Mittelteil zur Bildung des Filterkuchens
- [6] Oberteil zur Filterkuchenentnahme abnehmbar
- [7] Wartungs- und Druckregleinheit zur Einstellung des Überdrucks im Mittel- und Oberteil
- [8] 2 Manometer zur Anzeige des Drucks vor und nach dem Filter
- [9] 2 Schaugläser zur Beobachtung des Füllstands im Unterteil
- [10] Herstellung und Förderung der Suspension mit dem Suspensionsbereiter CE 285

### Technische Daten

- Nutschenbehälter
- Innendurchmesser: ca. 300mm
  - Volumen: ca. 75L
  - zulässiger Druck: 0,6bar
  - Material: Edelstahl

- Messbereiche
- Manometer:
    - ▶ 2x 0...1bar (Ø 160mm)
    - ▶ 1x 0,2...3bar

LxBxH: 600x900x1900mm  
Gewicht: ca. 120kg

### Für den Betrieb erforderlich

Druckluftanschluss: 3bar, Wasseranschluss, Abfluss

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

### Beschreibung

#### ■ Kuchenfiltration mit einer Drucknutsche

Nutschen werden zur diskontinuierlichen Kuchenfiltration von Suspensionen mit großen Feststoffkonzentrationen eingesetzt. Mit dem Suspensionsbereiter CE 285 wird eine Suspension aus Kieselgur und Wasser hergestellt und von oben in die Nutsche gefördert. Im unteren Flansch der Nutsche ist ein Siebboden mit Filtertuch eingelassen. Auf dem Filtertuch bildet sich aus dem abgetrennten Feststoff ein wachsender Filterkuchen. Durch den anliegenden Überdruck im oberen Bereich der Nutsche wird das Filtrat durch das Filtertuch und den Filterkuchen gedrückt.

Es wird im unteren Behälterteil gesammelt. Nach dem Filtrationsprozess wird der gewonnene Filterkuchen mit einer Waschflüssigkeit (Wasser) gewaschen und anschließend durch einen Luftstrom getrocknet.

**CE 285**  
Suspensionsbereiter**Spezifikation**

- [1] Versorgungseinheit zum Herstellen und Fördern von Suspensionen für Filtrationsversuchsstände
- [2] Rührbehälter mit Deckel und Rührwerk zur Herstellung einer Suspension
- [3] Exzentrerschneckenpumpe mit Überdruckschalter, Trockenlaufschutz und einstellbarer Drehzahl zur Förderung der Suspension

**Technische Daten**

Behälter: 200L, Edelstahl  
Rührwerk  
 ■ Leistung: 180W  
 ■ Drehzahl: 1000min<sup>-1</sup> (konstant)

Pumpe  
 ■ max. Förderdruck: ca. 5bar  
 ■ max. Förderstrom: ca. 300L/h

Messbereiche  
 ■ Manometer: 0...10bar

400V, 50Hz, 3 Phasen  
 400V, 60Hz, 3 Phasen  
 230V, 60Hz, 3 Phasen  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1850x850x1450mm  
 Gewicht: ca. 250kg

**Für den Betrieb erforderlich**

Wasseranschluss, Abfluss

**Lieferumfang**

- 1 Suspensionsbereiter
- 1 Gebinde Kieselgur
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

**Beschreibung**

■ **Versorgungseinheit für die Filtrationsversuchsstände CE 284, CE 286**

CE 285 versorgt die Filtrationsversuchsstände mit einer Suspension aus Kieselgur und Wasser (empfohlen). Die Suspension wird in dem Rührbehälter angesetzt. Der Rührer sorgt dafür, dass der Feststoff in Schwebelage bleibt und sich nicht absetzt. Eine Exzentrerschneckenpumpe fördert die Suspension zu dem angeschlossenen Versuchsstand.

Der Rotor der Pumpe ist aus Edelstahl gefertigt. Er bewegt sich in einem Gehäuse aus Elastomer. Ein Manometer zeigt den Förderdruck an. Ein Überdruckschalter sorgt für die Abschaltung der Pumpe bei zu hohem Druck. Ein Temperaturofnehmer ist als Trockenlaufschutz der Pumpe vorgesehen. Die Drehzahl der Pumpe kann an einem Potentiometer eingestellt werden.

Der Rührbehälter ist mit einem Füllstandanzeiger und drei Stromstörern ausgestattet. Für den Anschluss der Versorgungseinheit an den jeweiligen Filtrationsversuchsstand werden alle notwendigen Verbindungselemente mitgeliefert.

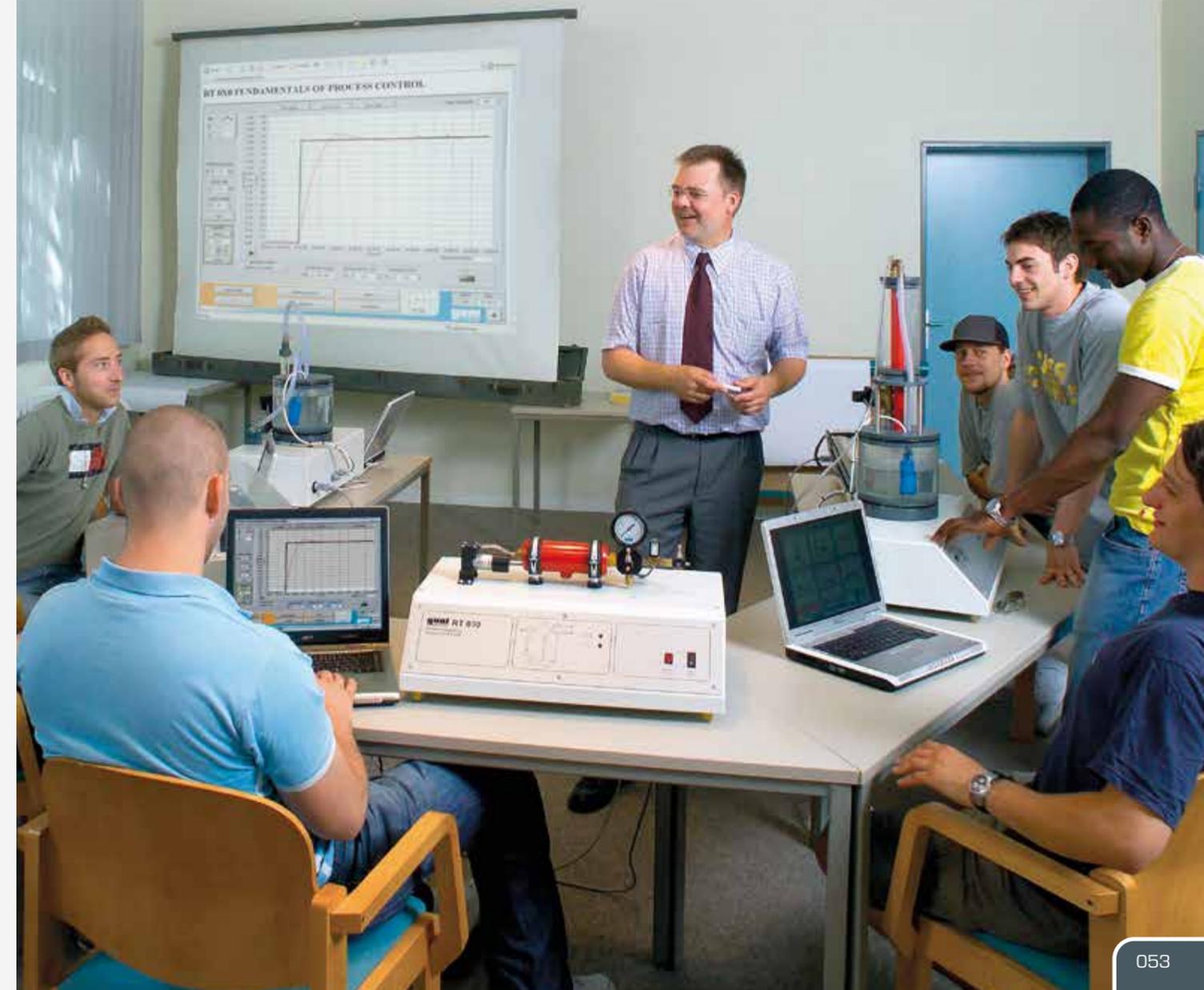
# Datenerfassung und Visualisierung



## Optimale Auswertung und Analyse der durchgeführten Versuche

Die GUNT-Software hat immer eine umfangreiche Online-Hilfe, mit der die Funktionen und die Anwendung erklärt wird.

Die GUNT-Software wird in unserem Haus von einer Gruppe erfahrener Ingenieure entwickelt und gepflegt.



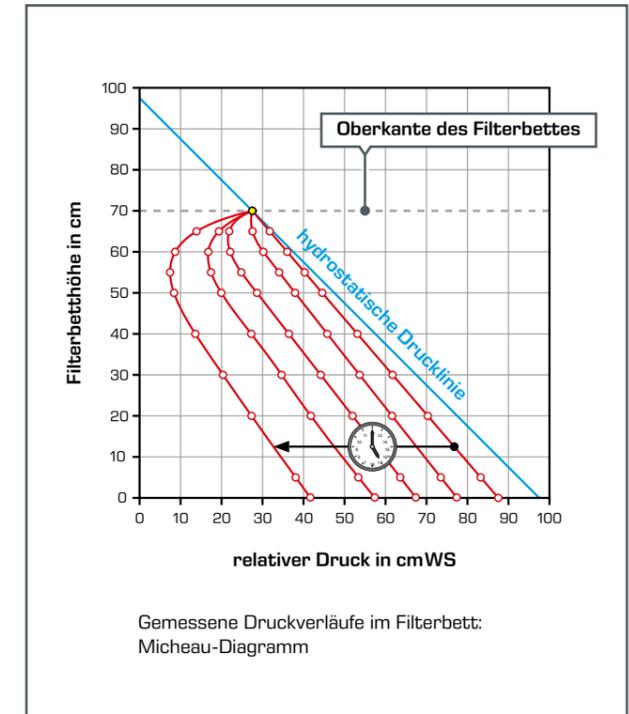
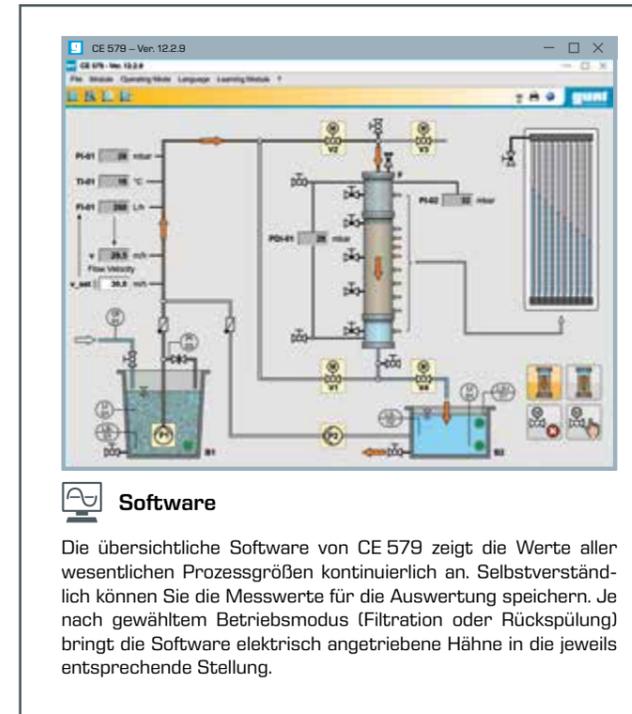
## Übersicht CE 579 Tiefenfiltration

### Tiefenfiltration: unverzichtbar bei der Wasserbehandlung

Die Tiefenfiltration stellt in der Wasseraufbereitung eine wichtige und häufig eingesetzte Verfahrensstufe dar. Genauere Kenntnisse über das Funktionsprinzip und die Besonderheiten dieses Verfahrens sind für angehende Ingenieure und Facharbeiter daher ein unverzichtbarer Baustein in der Ausbildung.

Der didaktische Schwerpunkt dieses Versuchszustandes liegt in der Untersuchung der Druckverhältnisse. Zur Messung der Drücke ist der Filter mit einer Differenzdruckmessung und einer Vielzahl einzelner Messstellen entlang des Filterbettes ausgestattet.

Diese Messstellen können mit einer Manometertafel verbunden werden, wodurch Sie die Druckverhältnisse im Filterbett sehr anschaulich sichtbar machen und sehr genau messen können. Durch die Verwendung eines transparenten Filterrohres können Sie die zunehmende Beladung des Filterbettes auch visuell gut beobachten. Der Filter kann bei Bedarf zurück gespült werden.



Elektrisch angetriebener Kugelhahn



Frequenzumrichter zur Steuerung der Pumpen



Anschlüsse an der Manometertafel zur Messung des Druckverlaufs im Filterbett

**Lerninhalte**

- Druckverhältnisse in einem Filter
- Einflussfaktoren auf den Druckverlust (Gesetz von Darcy)
  - ▶ Durchfluss
  - ▶ Höhe des Filterbettes
  - ▶ Durchlässigkeit des Filterbettes
- Druckverlauf im Filterbett bestimmen (Micheau-Diagramm)
- Rückspülung von Filtern
  - ▶ Fluidisierungsprozess beobachten
  - ▶ Expansion des Filterbettes bestimmen
  - ▶ erforderliche Fließgeschwindigkeit (Lockerungsgeschwindigkeit) bestimmen

**CE 579**  
Tiefenfiltration

Die Abbildung zeigt: Versuchsstand (links) und Versorgungseinheit (rechts).

**Beschreibung**

- **Filtration und Rückspülung**
- **Druckverhältnisse in einem Filter**
- **Software für Steuerung und Datenerfassung**

Die Tiefenfiltration ist ein wichtiges Grundverfahren der Wasserbehandlung. Mit CE 579 lässt sich dieses Verfahren anschaulich demonstrieren.

Mit Feststoffen verunreinigtes Rohwasser wird mit einer Pumpe von oben in einen Filter eingeleitet. Während das Rohwasser das Filterbett durchströmt, werden die Feststoffe zurückgehalten. Das Wasser hingegen passiert das Filterbett und tritt am unteren Ende des Filters wieder aus. Das Reinwasser (Filtrat) fließt anschließend in einen Behälter. Mit zunehmender Zeit lagern sich im Filterbett immer mehr Feststoffe ab. Dadurch steigt der Fließwiderstand des Filterbettes an. Dieser Vorgang ist als zunehmender Druckverlust zwischen Zulauf und Ablauf des Filters erkennbar. Der Durchfluss durch den Filter nimmt ab. Eine Rückspülung mit Reinwasser reinigt das Filterbett und reduziert den Druckverlust wieder.

Der Filter ist mit einer Differenzdruckmessung ausgestattet. Zusätzlich sind entlang des Filterbettes mehrere Druckmessstellen angeordnet. Die Drücke werden durch Schlauchverbindungen auf Rohrmanometer übertragen und dort als Wassersäulen angezeigt. Hiermit lassen sich Mischeau-Diagramme erstellen. Durchfluss, Temperatur, Differenzdruck und Systemdruck werden erfasst. Die Fließgeschwindigkeit im Filterbett kann eingestellt werden. An allen relevanten Stellen können Proben entnommen werden. Die Höhe des Filterbettes kann an einer Skala abgelesen werden.

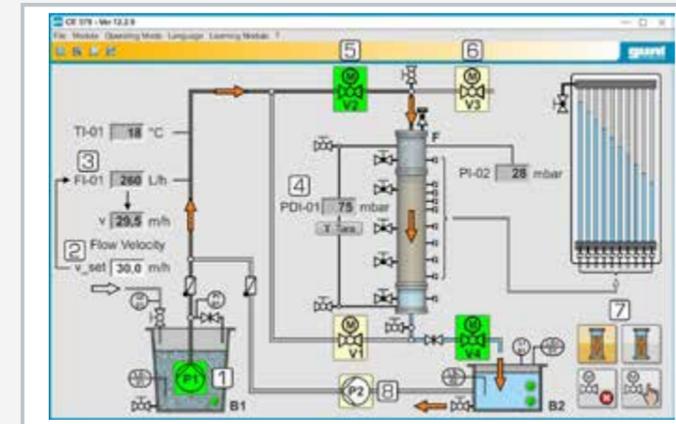
Für die Steuerung der Betriebszustände und die Datenerfassung steht eine Software zur Verfügung. Ein Prozessschema zeigt den aktuellen Betriebszustand der einzelnen Komponenten und die erfassten Daten an. Zur Herstellung des Rohwassers kann z.B. Kieselgur verwendet werden.

**Lerninhalte / Übungen**

- Druckverhältnisse in einem Filter
- Einflussfaktoren auf den Druckverlust (Gesetz von Darcy)
  - ▶ Durchfluss
  - ▶ Höhe des Filterbettes
  - ▶ Durchlässigkeit des Filterbettes
- Druckverlauf im Filterbett bestimmen (Mischeau-Diagramm)
- Rückspülung von Filtern
  - ▶ Fluidisierungsprozess beobachten
  - ▶ Expansion des Filterbettes bestimmen
  - ▶ erforderliche Fließgeschwindigkeit (Lockerungsgeschwindigkeit) bestimmen

**CE 579**  
Tiefenfiltration

1 Reinwasserbehälter, 2 Rückspülpumpe, 3 Manometertafel, 4 Differenzdruckaufnehmer, 5 Filter, 6 Systemdruckaufnehmer, 7 Kugelhahn mit Motor, 8 Durchflussaufnehmer, 9 Schaltschrank



Software von CE 579 (Betriebszustand: Filtration)

1 Rohwasserpumpe (in Betrieb), 2 Einstellung der Fließgeschwindigkeit, 3 Durchfluss, 4 Differenzdruck, 5 Kugelhahn mit Motor (geöffnet), 6 Kugelhahn mit Motor (geschlossen), 7 Einstellung der Kugelhähne mit Motor, 8 Rückspülpumpe (außer Betrieb)

**Spezifikation**

- [1] Tiefenfiltration und Rückspülung
- [2] separate Versorgungseinheit mit Behälter und Pumpe für Rohwasser
- [3] Pumpe für Rückspülung des Filters
- [4] 10 Rohrmanometer zur Bestimmung der Drücke
- [5] Erstellung von Mischeau-Diagrammen
- [6] magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer
- [7] 4 Kugelhähne mit Motor
- [8] Erfassung von Durchfluss, Differenzdruck, Systemdruck und Temperatur
- [9] Regelung der Fließgeschwindigkeit
- [10] GUNT-Software mit Steuerungsfunktionen und Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

**Technische Daten**

## Filter

- Innendurchmesser: 106mm
- Gesamthöhe: 1125mm
- max. Filterbetthöhe: ca. 700mm

## Rohwasserpumpe

- max. Förderstrom: 150L/min
- max. Förderhöhe: 9m

## Rückspülpumpe

- max. Förderstrom: 40L/min
- max. Förderhöhe: 10m

## Behälter für Rohwasser und Reinwasser

- Volumen: je 180L

## Messbereiche

- Durchfluss: 0...1300L/h
- Druck: 1x 0...0,6bar, 10x 0...1260mmWS
- Differenzdruck: -1...1bar
- Temperatur: 0...100°C
- Filterbetthöhe: 0...720mm

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase, 230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 1900x790x1900mm Versuchsstand

LxBxH: 1200x790x1200mm Versorgungseinheit

Gesamtgewicht: ca. 370kg

**Für den Betrieb erforderlich**

Wasseranschluss, Abfluss, PC mit Windows

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 Versorgungseinheit
- 1 Satz Schläuche
- 1 Gebinde Kies
- 1 Gebinde Kieselgur
- 1 Sieb mit Auffangboden
- 5 Messbecher
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen Zerkleinerung

Durch Zerkleinern wird die Partikelgröße, die Partikelform und die Oberfläche von Feststoffen verändert. Nahezu alle Feststoffe müssen bei der Gewinnung oder Verarbeitung zerkleinert werden.

### ■ Erzeugen von Zwischen- oder Endprodukten mit bestimmten Partikelgrößen

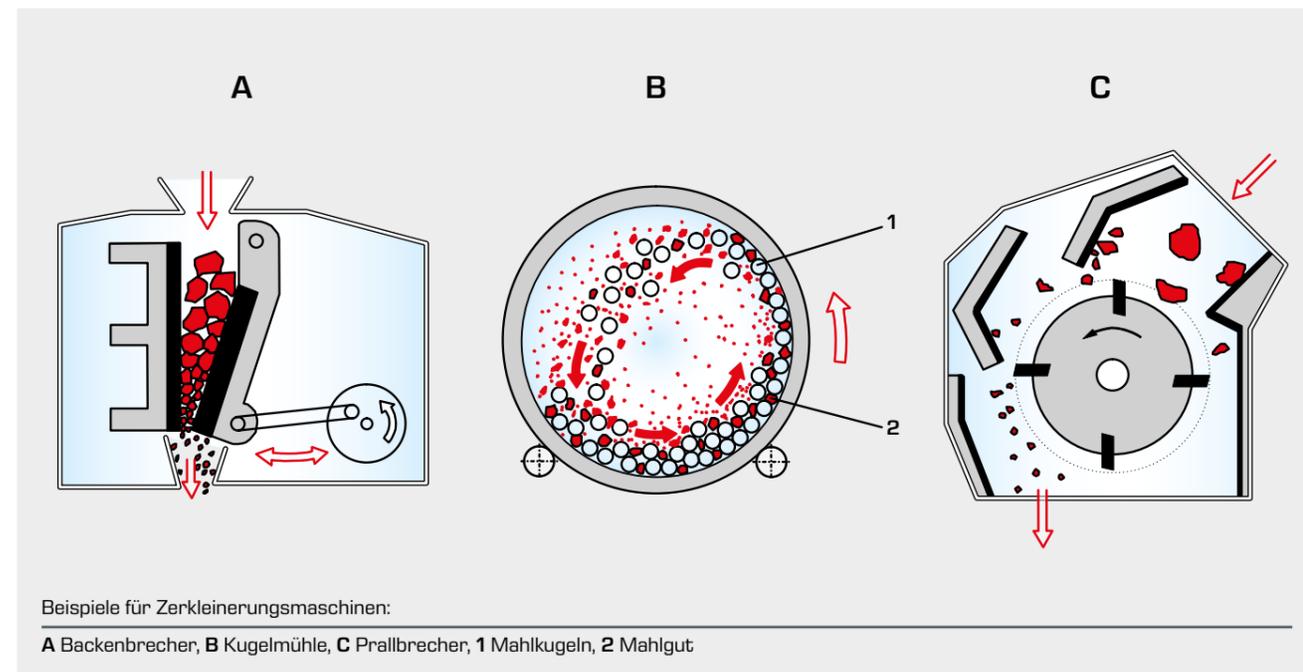
Für viele Verarbeitungsprozesse von Feststoffen sind bestimmte Partikelgrößen erforderlich, um ein gewünschtes Produkt herzustellen. So müssen z.B. thermoplastische Kunststoffe als Granulat einer bestimmten Größe als Vorprodukt geliefert werden. In dieser Form lassen sie sich am besten aufschmelzen und umformen.

### ■ Vergrößerung der Oberfläche

Chemische Reaktionen verlaufen umso rascher, je größer die Oberfläche der miteinander reagierenden Stoffe ist. So verbrennt feingemahlener Kohlenstaub explosionsartig, während große Kohlestücke nur langsam verbrennen. Das Lösen von Salzen in Flüssigkeiten geht ebenfalls schneller von statten, je geringer die Partikelgröße ist.

### ■ Aufschließen von Wertstoffen aus Feststoffgemischen

Abfallstoffe, mineralische und pflanzliche Rohstoffe bestehen aus unterschiedlichen Komponenten. Um die Wertstoffe für die weitere Verarbeitung freizulegen, müssen die Rohstoffe zerkleinert werden. Oft schließt sich dem Zerkleinerungsprozess ein Sortierprozess zur Abtrennung des Wertstoffs an. Ein wichtiges Beispiel ist die Gewinnung von Eisenerzen aus Gesteinsgemischen.



Das Ergebnis eines Zerkleinerungsprozesses hängt hauptsächlich von der angewandten Beanspruchungsart ab. Bei den meisten Zerkleinerungsmaschinen findet eine Beanspruchung zwischen zwei Festkörperflächen oder durch Prall statt:

### ■ Beanspruchung zwischen Festkörperflächen

Die Partikel befinden sich zwischen zwei Flächen, die sich relativ zueinander bewegen. Dabei werden die Partikel z.B. durch Druck, Scherung, Schlag oder Schneiden beansprucht. Diese Art der Beanspruchung findet z.B. bei Backenbrechern, Wälz- oder Kugelmühlen statt.

### ■ Prallbeanspruchung

Die Partikel prallen entweder mit hoher Geschwindigkeit gegen eine feststehende Wand oder ein Werkzeug bewegt sich gegen ein frei fliegendes Partikel. Die Zerkleinerung kann auch bei dem Zusammenstoß zweier Partikel geschehen. Typische Zerkleinerungsmaschinen, bei denen die Partikel durch Prall beansprucht werden, sind Prallbrecher und Hammerbrecher.

## CE 245 Kugelmühle



### Beschreibung

#### ■ Zerkleinerung mit einer Kugelmühle ■ Beobachtung des Mahlprozesses

Kugelmühlen gehören zu den Mahlkörpermühlen. Die Trommeln lassen sich an den Stirnflächen öffnen und mit dem Mahlgut (empfohlen wird Kalkstein) und den Mahlrollen befüllen. Sie werden auf einer Antriebsrolle und eine Losrolle mit verstellbaren Achsabständen gelagert. Bei kleinen Drehzahlen erfolgt die Zerkleinerung durch Abrollen der Kugeln auf dem Gut (Kaskadenbewegung). Bei höheren Drehzahlen werden einige Kugeln an der Wand empor gehoben, lösen sich ab und fallen auf das Mahlgut (Kataraktbewegung). Oberhalb der kritischen Drehzahl sorgen Fliehkräfte dafür, dass keine Zerkleinerung mehr stattfindet. Diese Bewegungszustände können durch die transparenten Stirnflächen der Trommeln beobachtet werden.

Um den theoretischen mit dem realen Leistungsbedarf vergleichen zu können, wird die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors digital angezeigt. Zur Bewertung des Zerkleinerungserfolgs wird eine Analysesiebmaschine (CE 264) empfohlen.

### Lerninhalte / Übungen

- Kaskaden- und Kataraktbewegung, kritische Drehzahl
- theoretischer und realer Leistungsbedarf
- Zerkleinerungsgrad in Abhängigkeit von Mahlzeit, Drehzahl, Kugeldurchmesser, Kugelfüllungsgrad, Mahlgut

### Spezifikation

- [1] Zerkleinern von Feststoffen mit einer Kugelmühle
- [2] 2 Trommeln mit Stahlmantel und transparenten Stirnflächen, 1 Trommel aus Stahl mit Hubleisten
- [3] 1 Antriebsrolle mit einstellbarer Drehzahl, 1 Losrolle
- [4] Achsabstände der Rollen zur Aufnahme verschiedener Trommeln einstellbar
- [5] Messung der Leistungsaufnahme
- [6] Mahlzeit über Timer einstellbar

### Technische Daten

2 Trommeln mit Stirnflächen aus Borosilikat

- Ø 100mm/185mm
- Volumen: ca. 1,15L/7,5L

1 Trommel mit Hubleisten

- Ø 185mm
- Volumen: ca. 7,5L

Antriebsrolle, Losrolle

- Ø ca. 50mm

1 Satz Mahlrollen

- Ø 5/10/15mm

Messbereiche

- Leistungsaufnahme: 0...200W
- Drehzahl: 0...370min<sup>-1</sup>

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase

120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 600x520x460mm

Gewicht: ca. 76kg

### Lieferumfang

- 1 Kugelmühle
- 3 Mahltrommeln
- 1 Satz Mahlrollen
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

Basiswissen  
Mischen

Mischen ist das Gegenteil von Trennen. Die zu mischenden Stoffe können gasförmig, flüssig oder fest sein. Beim Feststoffmischen handelt es sich um pulverförmige oder körnige Stoffe. Ziel ist es, möglichst homogene Gemische herzustellen. Beim Rühren ist die kontinuierliche Phase flüssig. Eine Flüssigkeit, ein Gas oder ein Feststoff werden einer Flüssigkeit zugemischt. Wichtige Anwendungen des Rührens sind:

#### ■ Verteilen von löslichen Feststoffen in Flüssigkeiten

Der Feststoff wird in der Flüssigkeit verteilt und dabei in Atome, Moleküle oder Ionen zerlegt. Der Feststoff ist nach dem Lösen nicht mehr als solcher zu erkennen. Rühren beschleunigt den Lösungsprozess.

#### ■ Verteilen eines unlöslichen Feststoffs in einer Flüssigkeit (suspendieren)

Die entstehenden Suspensionen neigen zum Entmischen, d.h. die Feststoffpartikel würden mit der Zeit absinken. Erst bei Partikelgrößen unter  $1\mu\text{m}$  entstehen stabile Suspensionen. Ein Beispiel sind Lacke, bei denen Farbpigmentpartikel in Harzen suspendiert vorliegen.

#### ■ Mischen von nicht ineinander löslichen Flüssigkeiten (emulgieren)

Die zu verteilende flüssige Phase liegt in Tröpfchenform in der anderen Flüssigphase vor. Dies ist zum Beispiel bei kosmetischen Cremes und Lotionen der Fall.

#### ■ Mischen ineinander löslicher Flüssigkeiten

Zweck ist der Ausgleich von Konzentrations- und Temperaturunterschieden. Außerdem kann der Reaktionsablauf im Gemisch gesteuert werden, da die Reaktionsgeschwindigkeit von der Mischgüte der Reaktionspartner abhängt.

#### Beispiel

Bei der Herstellung von Tabletten führt eine schlechte Durchmischung der Ausgangsstoffe zu unterschiedlichen Wirkstoffgehalten in den Tabletten.

#### ■ Begasen von Flüssigkeiten

Über ein Lochblech oder andere Formen von Injektoren werden Gasbläschen in der Flüssigkeit fein verteilt. Eine Anwendung ist die Ausfällung von Eisenoxiden durch Injizieren von Luft bei der Abwasserbehandlung.

Je nach Anwendungsfall kommen Rührer der unterschiedlichsten Formen zum Einsatz. Sie lassen sich grob nach dem erzeugten Strömungsfeld unterscheiden. Dementsprechend gibt es axial-, radial- und tangentialfördernde Rührer. Stromstörer werden eingesetzt, um zu verhindern, dass der gesamte Behälterinhalt mit dem Rührer mitrotiert.

Basiswissen  
Agglomeration

Agglomerieren ist das Gegenteil von Zerkleinern. Die Begriffe Agglomeration, Granulation und Pelletierung bezeichnen den Prozess der Kornvergrößerung von Feststoffen. Pulverförmiges Feingut wird zu größeren Partikelverbänden zusammengefügt. Die Partikelverbände können als Flocken, Granulate, Agglomerate, Pellets, Briketts oder Tabletten bezeichnet werden. Grund für das Anwenden eines Agglomerationsverfahrens kann die Verbesserung des Fließverhaltens, eine bessere Mischbarkeit, die Herabsetzung von Staubentwicklung oder die gezielte Einstellung von Form, Größe, Porosität, Festigkeit etc. sein.

Grob lassen sich folgende Agglomerationsverfahren unterscheiden:

#### ■ Aufbauagglomeration

Es findet eine Zusammenlagerung einzelner, frei beweglicher Partikel zu größeren Verbänden oder deren Anlagerung an existierende Partikelverbände statt. Oft werden Flüssigkeiten als Bindemittel eingesetzt. Aufbauagglomeration kann in Wirbelschichten stattfinden. Bei der Rollagglomeration entstehen größere Partikelverbände durch Abrollen nach dem Schneeballprinzip. Die technische Umsetzung erfolgt mit Granuliertellern, Granuliertrommeln oder Mischern.

#### ■ Pressagglomeration

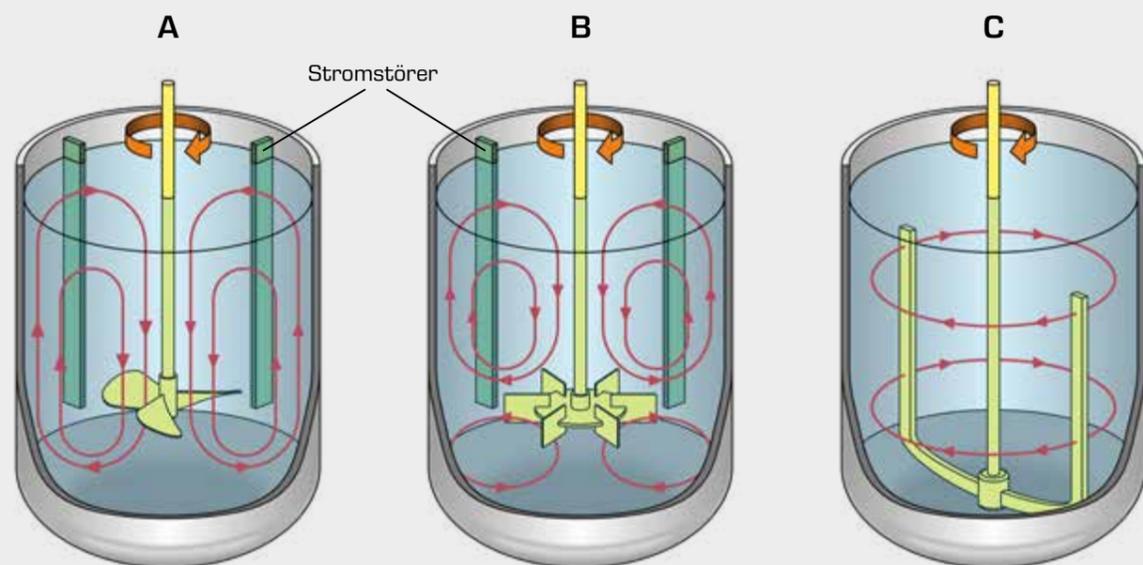
Aus einem pulverförmigen Feststoff wird unter Einwirkung äußerer Druckkräfte ein Agglomerat gebildet. Beim Tablettieren wird das Pulver hierzu in einer Matrize mit einem Stempel verdichtet. Eine weitere Anwendung ist das Walzenpressen, wobei zwei glatte Walzen (Ergebnis sind ungleichmäßige Agglomerate) oder Walzen mit muldenartigen Vertiefungen (Ergebnis sind Formteile wie Briketts) zum Einsatz kommen.

#### ■ Weitere Verfahren: Flockung zur Abscheidung von Schwebstoffen aus Flüssigkeiten, Sintern.

Je nach Verfahren werden unterschiedliche Bindungsmechanismen mit verschiedenen Haftkräften wirksam (siehe Abbildung). Grundsätzlich lassen sich dabei Mechanismen mit und ohne stoffliche Verbindung unterscheiden. Am stabilsten sind Festkörperbrücken, die durch Sintern entstehen. Festkörperbrücken können auch bei anderen Verfahren entstehen, wenn aushärtende oder kristallisierende Bindemittel verwendet werden.

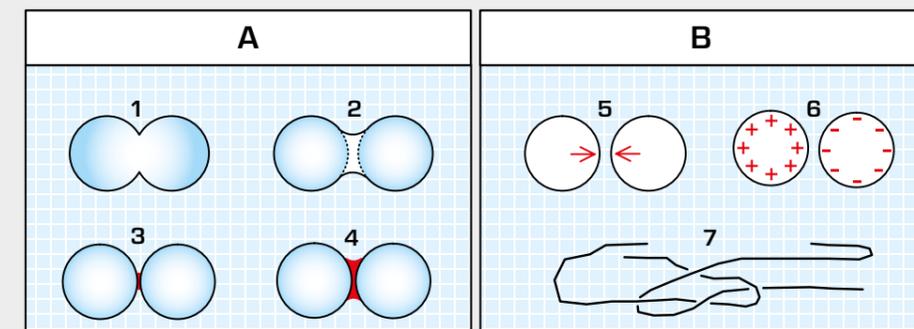
Bei der Aufbauagglomeration spielt vor allem die Haftung durch Flüssigkeitsbrücken eine große Rolle. Abhängig vom Verhältnis Flüssigkeit/Feststoff, der Art der Flüssigkeit sowie der Porenform und -größe entstehen fest an die Oberfläche gebundene Adsorptionsschichten oder frei bewegliche Flüssigkeitsbrücken.

Bei van-der-Waals- und elektrostatischen Kräften liegt keine stoffliche Verbindung vor. Van-der-Waals-Kräfte spielen bei der Pressagglomeration eine große Rolle. Formschlüssige Verbindungen treten bei Faserstoffen wie Papier und Filz auf.



Typische Strömungsfelder in Rührbehältern:

A Propellerrührer (axial), B Scheibenrührer (radial), C Ankerrührer (tangential)



Bindungsmechanismen in Agglomeraten:

A Mechanismen mit stofflicher Verbindung, B Mechanismen ohne stoffliche Verbindung;

1 Festkörperbrücke durch Sintern, 2 Festkörperbrücke aus aushärtendem oder kristallisierendem Bindemittel, 3 Flüssigkeitsbrücke mit fest gebundener Adsorptionsschicht, 4 frei bewegliche Flüssigkeitsbrücke, 5 Anziehung durch van-der-Waals-Kräfte, 6 elektrostatische Anziehung, 7 formschlüssige Bindung



**CE 320**  
Rühren**Lerninhalte / Übungen**

- Strömungsfelder verschiedener Rührertypen
- Leistungsbedarf, Mischzeit, Mischgüte in Abhängigkeit
  - ▶ des Rührertyps
  - ▶ der Drehzahl
  - ▶ der eingesetzten Stoffe (Dichte, Viskosität)
  - ▶ des Einsatzes von Stromstörern
- Beobachtung des Schwebezustands von suspendierten Feststoffen bei unterschiedlichen Rührern und Drehzahlen
- Beobachtung der Tropfengröße von Emulsionen bei unterschiedlichen Rührern und Drehzahlen

**Beschreibung**

- Visualisierung von Strömungsfeldern beim Einsatz verschiedener Rührertypen
- leistungsstarkes Rührwerk mit Drehzahlregelung
- Bestimmung der Mischzeit von Lösungen
- Mischen von Emulsionen und Suspensionen
- Leistungsbedarf beim Rühren

Beim Rühren ist die kontinuierliche Phase flüssig. Mit CE 320 kann die Herstellung von Lösungen (gelöster Feststoff in Flüssigkeit), Emulsionen (Gemisch nicht ineinander löslicher Flüssigkeiten) und Suspensionen (unlöslicher Feststoff in Flüssigkeit) untersucht werden.

In einem chemikalien- und temperaturbeständigen Behälter erfolgt der Mischprozess. Mit dem leistungsstarken Rührwerk können auch hochviskose Gemische hergestellt werden.

Die Drehzahl ist einstellbar, das Drehmoment wird am Gerät digital angezeigt. Somit ist die Bestimmung des Leistungsbedarfs möglich.

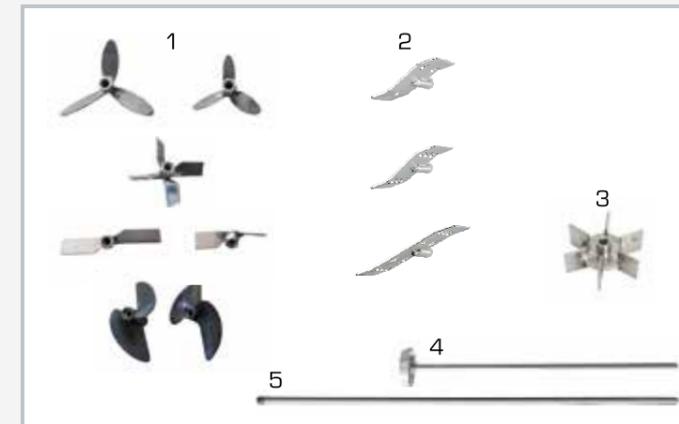
Es stehen zwölf unterschiedliche, leicht austauschbare Rührer zur Verfügung. Mit Kunststoffkugeln, die im Fluid dispergiert werden, ist es möglich, die charakteristischen Strömungsfelder der unterschiedlichen Rührertypen zu beobachten.

Es können Stromstörer in den Behälter eingesetzt werden, um deren Einfluss auf den Mischprozess zu untersuchen. Für die Bestimmung der Mischzeit und -güte von Lösungen steht ein Leitfähigkeitsmessgerät zur Verfügung. Mit dem Gerät können auch Temperaturen gemessen werden.

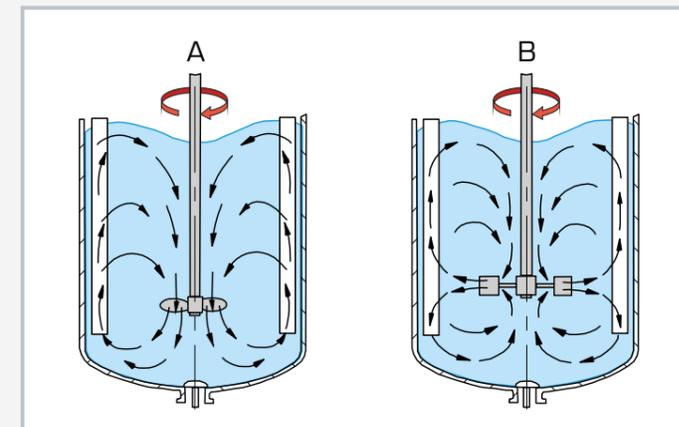
Eine herausnehmbare Rohrschlange dient als Wärmeübertrager. Sie kann mit laborseitig bereitgestelltem Wasser als Heiz- oder Kühlmedium betrieben werden. Ein Ventil mit Feinregulierung dient der Einstellung des Durchflusses. Auf diese Weise ist es möglich, den Einfluss von Temperaturänderungen auf den Mischprozess zu untersuchen, z.B. aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Fluids.

**CE 320**  
Rühren

1 Rührwerk mit Drehzahl- und Drehmomentanzeige, 2 Turbinenrührer und Gewindewelle für Rührorgane, 3 Rührorgane, 4 Leitfähigkeitsmessgerät, 5 Ablauf, 6 Stromstörer, 7 Rohrschlange, 8 Absperrventil für Rohrschlange



1 Propellerrührer, 2 Blattrührer, 3 Scheibenrührer, 4 Turbinenrührer, 5 Gewindewelle für Rührorgane



Strömungsfelder im Rührbehälter mit axialförderndem Rührer (A) und radialförderndem Rührer (B)

**Spezifikation**

- [1] Untersuchung von Mischprozessen beim Rühren
- [2] transparenter Rührbehälter mit 4 herausnehmbaren Stromstörern
- [3] drehzahlgeregeltes Rührwerk mit digitaler Drehmomentanzeige
- [4] 12 austauschbare Rührer: axialfördernd, radialfördernd, tangentialfördernd
- [5] herausnehmbare Rohrschlange zum Kühlen oder Heizen mit externer Wasserversorgung
- [6] Handgerät zur Messung von Leitfähigkeit und Temperatur

**Technische Daten****Rührbehälter**

- Nennvolumen: ca. 15L
- Material: DURAN-Glas und PVDF (Boden)

**Rührorgane**

- 7 Propellerrührer
  - ▶ 2x 3 Flügel, Ø 70mm / 100mm
  - ▶ 1x 4 Flügel, Ø 70mm
  - ▶ 1x 2 Flügel, Ø 76mm, links
  - ▶ 1x 2 Flügel, Ø 76mm, rechts
  - ▶ 2x 2 Flügel (abgewinkelt), Ø 70mm / 100mm
- 3 Blattrührer
  - ▶ 2x Ø 70mm mit 3 / 6 Löchern
  - ▶ 1x Ø 100mm mit 10 Löchern
- 1 Turbinenrührer mit Welle: Ø 50mm
- 1 Scheibenrührer
  - ▶ Anzahl der Scheiben 6, Ø 70mm

**Rohrschlange**

- Durchmesser: ca. 140mm
- Material: Edelstahl

**Messbereiche**

- Leitfähigkeit: 0...200mS/cm
- Temperatur: -5...100°C
- Drehzahl: 50...2000min<sup>-1</sup>

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase

120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1070x790x1950mm

Gewicht: ca. 83kg

**Für den Betrieb erforderlich**

Wasseranschluss, Abfluss

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 12 Rührorgane
- 1 Satz Zubehör
- 1 Leitfähigkeitsmessgerät
- 1 Gebinde Kunststoffkugeln
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht

## CE 322 Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters

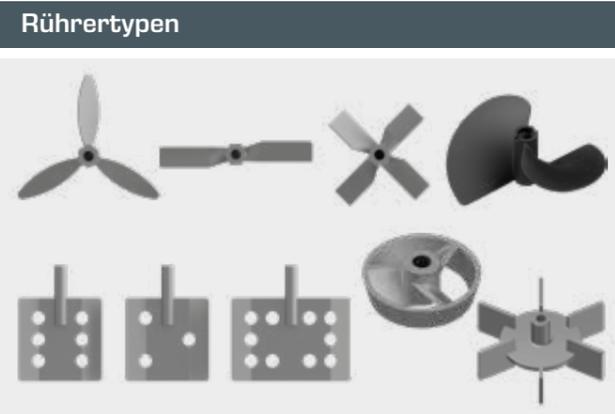
Mischprozesse werden maßgeblich von den Fließeigenschaften der beteiligten Stoffe bestimmt. Die Beschreibung der Fließeigenschaften ist Gegenstand der **Rheologie**. Mit diesem Gerät können Sie alle charakteristischen Größen zur Beschreibung eines Rührprozesses bestimmen. Hierzu zählen insbesondere Mischzeitkennlinien und Leistungskennlinien.

Hauptkomponente des Gerätes ist ein hochwertiges Rührwerk mit einer integrierten Vorrichtung zur Messung des Drehmomentes. Der Rührvorgang erfolgt in einem runden Glasbehälter. Somit kann der Rührprozess optimal beobachtet werden. Bei Verwendung einer Salzlösung lässt sich der Fortschritt des Rührprozesses durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit zuverlässig erfassen. Eine große Auswahl unterschiedlicher Rührertypen ermöglicht eine Vielzahl an Versuchsvarianten. Folgende Rührertypen sind enthalten:

- Schrägblattrührer
- Propellerrührer
- Blattrührer
- Turbinenrührer

Der Rührbehälter lässt sich mit Stromstörern ausstatten, deren Anzahl und Position variiert werden kann. Die Viskosität des Mediums hat entscheidenden Einfluss auf den Rührprozess. Da die Viskosität von der Temperatur abhängig ist, kann in den Rührbehälter ein Wärmeübertrager in Form einer Rohrschlinge eingesetzt werden.

Zum Produkt:



- 1 Rührbehälter
- 2 Durchflussmesser
- 3 Durchflussregler
- 4 Temperaturregler
- 5 digitale Anzeige für Leitfähigkeit
- 6 Leitfähigkeitsaufnehmer
- 7 Temperaturaufnehmer
- 8 Rührwerk mit Drehmomentmessung
- 9 Anschlüsse für Warm- und Kaltwasser

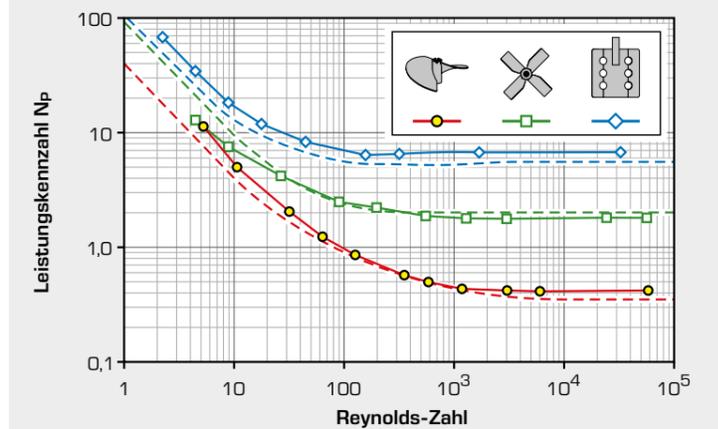
## Rührertypen



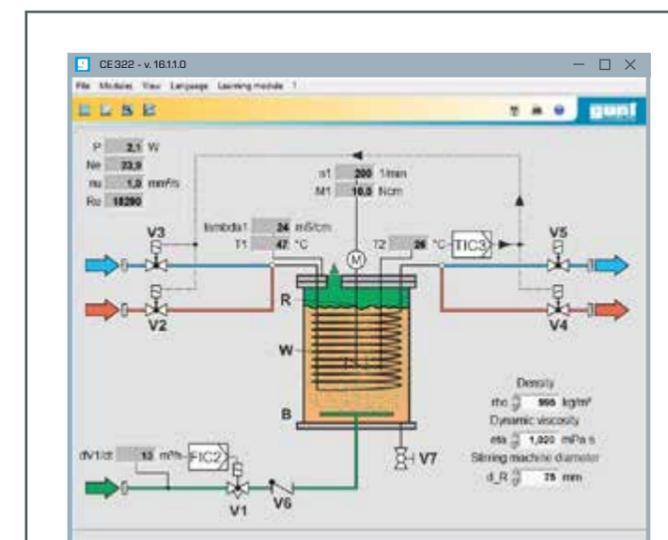
Rührbehälter mit eingebautem Wärmeübertrager

## Leistungskennlinien

Eine Leistungskennlinie stellt die Leistungszahl  $N_p$  in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl dar. Mit Hilfe der Leistungszahl lässt sich die erforderliche Leistung eines Rührwerkes bestimmen, was für die Bemessung eines Rührwerkes von zentraler Bedeutung ist. Der Verlauf einer Leistungskennlinie ist vom Rührertyp abhängig.



Mit CE 322 gemessene Leistungskennlinien im Vergleich zu Kennlinien aus der Fachliteratur



Software von CE 322

## Software

Die Messwerte werden digital angezeigt und können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der mitgelieferten Software gespeichert werden.

## Lerninhalte

- Mischzeitkennlinien bestimmen
  - ▶ Mischzeit und Mischungsgrad
  - ▶ Mischzeitkennzahl
- Leistungskennlinien bestimmen
  - ▶ Leistungsbedarf
  - ▶ Leistungszahl (Newton-Zahl)
- Einfluss von
  - ▶ Rührertyp
  - ▶ geometrische Verhältnisse
  - ▶ Drehzahl
  - ▶ Stoffeigenschaften (Dichte und Viskosität)
- Strömungszustand mittels Reynolds-Zahl beurteilen (laminar/turbulent)
- Wirkungsweise von Stromstörern
- Begasung und Wärmeübertragung in Rührbehältern
- Strömungsfelder von verschiedenen Rührertypen beobachten: bei Lösungen, Emulsionen und Suspensionen

## CE 322

### Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters



#### Lerninhalte / Übungen

- Mischzeitkennlinien bestimmen
  - ▶ Mischzeit und Mischungsgrad
  - ▶ Mischzeitkennzahl
- Leistungskennlinien bestimmen
  - ▶ Leistungsbedarf
  - ▶ Leistungskennzahl (Newton-Zahl)
- Einfluss von
  - ▶ Rührertyp
  - ▶ geometrische Verhältnisse
  - ▶ Drehzahl
  - ▶ Stoffeigenschaften (Dichte und Viskosität)
- Strömungszustand mittels Reynolds-Zahl beurteilen (laminar/turbulent)
- Wirkungsweise von Stromstörern
- Begasung und Wärmeübertragung in Rührbehältern
- Strömungsfelder von verschiedenen Rührertypen beobachten: bei Lösungen, Emulsionen und Suspensionen

#### Beschreibung

##### ■ Rührwerk mit direkter Drehmomentmessung zur Bestimmung der Leistungskennlinien

Das Vermischen von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen ist für die Herstellung vieler Produkte erforderlich. Die Anforderungen an das Rührwerk variieren stark mit den jeweiligen Stoffen, sodass eine große Vielfalt unterschiedlicher Rührwerke erhältlich ist.

Beim Rühren ist die kontinuierliche Phase flüssig. Mit CE 322 kann die Herstellung von Lösungen (gelöster Feststoff in Flüssigkeit), Emulsionen (Gemisch nicht ineinander löslicher Flüssigkeiten) und Suspensionen (unlöslicher Feststoff in Flüssigkeit) untersucht werden.

Der Mischprozess erfolgt in einem Rührbehälter mit Rohrschlange, Stromstörern und Gasverteiler im Boden. Alle Einbauten sind herausnehmbar.

Das Rührwerk befindet sich oberhalb des Rührbehälters, ist absenkbar und für die Untersuchung viskoser Stoffe leistungsstark. Die Drehzahl ist einstellbar. Somit ist eine detaillierte Untersuchung von verschiedenen Rührern und Stoffen, auch mit Begasung, möglich (Empfehlung: Wasser, Glycerin, Druckluft).

Es stehen zwölf verschiedene austauschbare Rührer zur Verfügung. Unter Zuhilfenahme von Kunststoffkugeln können die charakteristischen Strömungsfelder der unterschiedlichen Rührertypen beobachtet werden.

Versuche zum Einfluss der Viskosität können mit unterschiedlichen Stoffen oder unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Mit den Stromstörern kann der Einfluss auf den Mischprozess untersucht und auch visuell gezeigt werden.

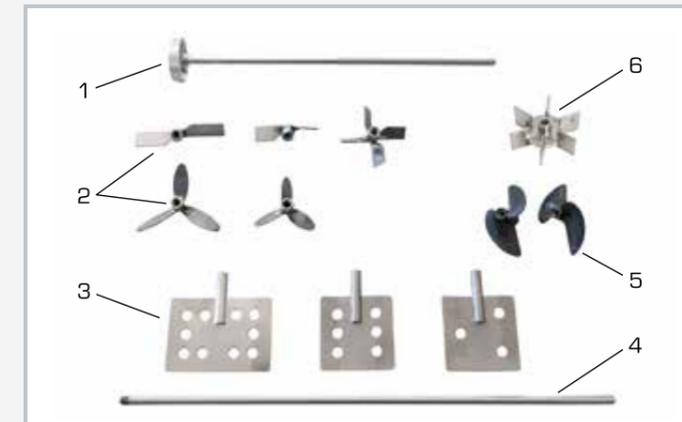
Aufnehmer erfassen elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im Rührbehälter. Die Bestimmung der Mischzeit und des Mischungsgrads von Lösungen erfolgt mit den elektrischen Leitfähigkeiten. Drehmoment und Drehzahl werden für die Leistungskennlinien verwendet. Die Messwerte werden digital angezeigt und können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der mitgelieferten Software gespeichert werden.

## CE 322

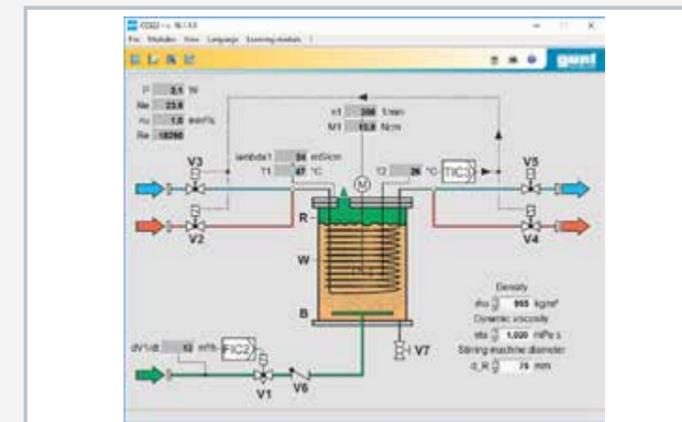
### Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters



1 Rührwerk, 2 Drehmomentmessung, 3 elektrische Leitfähigkeitsmessung, 4 Temperatureinstellung, 5 Durchflusseinstellung für Gas, 6 Rohrschlange, 7 Anschlüsse für Warm- und Kaltwasser sowie Gas, 8 freie Anschlüsse für weitere Messinstrumente



1 Turbinenrührer, 2 Schrägblattrührer, 3 Blattrührer, 4 Gewindewelle, 5 Propellerrührer, 6 Scheibenrührer



Screenshot der Software

#### Spezifikation

- [1] Herstellung von Lösungen, Emulsionen und Suspensionen mit unterschiedlichen Viskositäten
- [2] Rührbehälter mit Rohrschlange, Stromstörern und Gasverteiler im Boden; Einbauten herausnehmbar
- [3] absenkbares Rührwerk mit einstellbarer Drehzahl
- [4] 12 Rührer mit unterschiedlichen Geometrien
- [5] Kunststoffkugeln zur Visualisierung von Strömungsfeldern
- [6] Aufnehmer und digitale Anzeigen für elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Drehzahl, Drehmoment, Durchfluss
- [7] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 10

#### Technische Daten

##### Rührbehälter

- Volumen: ca. 15L
- Material: DURAN-Glas und PVC
- Deckel mit 2 freien Anschlüssen für eigene Sensorik
- Gasverteiler: Bohrungen  $\varnothing$  1,25mm

##### Rührer

- 2 Propellerrührer
- 3 Blattrührer
- 5 Schrägblattrührer
- 1 Turbinenrührer
- 1 Scheibenrührer

##### Rohrschlange

- Länge: 9,4m,  $\varnothing$  140mm

##### Messbereiche

- Leitfähigkeit: 0...100mS/cm
- Temperatur: 0...100°C
- Drehzahl: 6...2000min<sup>-1</sup>
- Drehmoment: 0...200Ncm
- Durchfluss: 1...250L/min

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 800x500x1000mm (Versuchsgerät)  
LxBxH: 600x400x150mm (Aufbewahrungssystem)  
Gesamtgewicht: ca. 80kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Warm- und Kaltwasseranschluss, Abfluss  
Druckluft (0...9m<sup>3</sup>/h, min. 3bar)  
PC mit Windows empfohlen

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Aufbewahrungssystem
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 255

### Rollagglomeration



#### Beschreibung

- Rollagglomeration mit einem Granulierteller
- Festigkeitsprüfung der Agglomerate zur Bewertung des Prozesses
- praxiserprobte Versuche im Labormaßstab

Die Begriffe Agglomeration, Granulation und Pelletierung bezeichnen den Prozess der Kornvergrößerung von Feststoffen. Dieser Versuchsstand zum Thema Rollagglomeration (Aufbauagglomeration) ist in Zusammenarbeit mit dem **Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Hochschule Niederrhein (Krefeld)** entwickelt worden.

Auf einen schräggestellten, rotierenden Granulierteller wird kontinuierlich ein Pulver (Feingut) gegeben. Eine Pumpe fördert Granulierflüssigkeit zu einer Zweistoffdüse. Die Flüssigkeit wird mit Druckluft über dem Pulver zerstäubt. Ausgehend von wenigen angefeuchteten Partikeln bilden sich durch eine Rollbewegung wachsende Kugeln (Agglomerate). Das Feingut in der bewegten Schicht verbleibt eher in Bodennähe. Es wird durch die Drehbewegung des Tellers höher gehoben als die sich bildenden Agglomerate. Die kugelförmigen Agglomerate rollen an der Oberfläche der Schicht.

Wenn sie eine bestimmte Größe erreicht haben, verlassen sie den Teller über den Rand. Die Agglomerate werden in einem Behälter gesammelt. Für den Feststoff (empfohlen wird Kalksteinpulver) und die Granulierflüssigkeit (Puderzucker in Wasser gelöst) stehen zwei weitere Behälter zur Verfügung. Aufgabenmassenstrom des Feststoffs, Flüssigkeitsförderstrom, Drehzahl und Neigungswinkel des Tellers sind einstellbar. Die Druckfestigkeit der entstandenen Agglomerate kann mit einem labor-eigenen Gerät ermittelt werden. Zur Ermittlung dieser und weiterer wichtiger Eigenschaften der Agglomerate wird außerdem ein Trockenschrank empfohlen.

#### Lerninhalte / Übungen

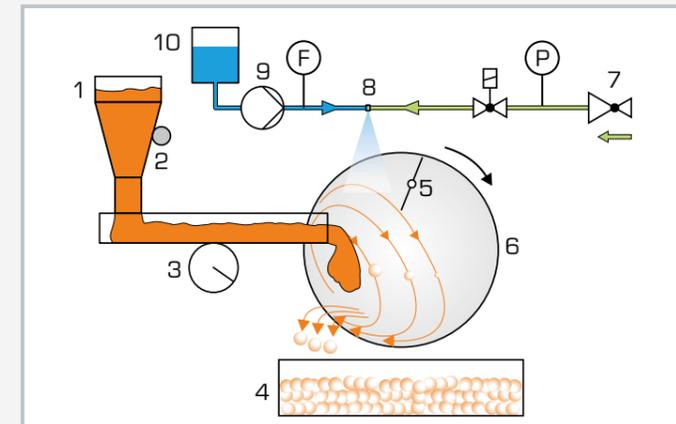
- Grundprinzip und Betriebsverhalten einer Agglomerationsanlage kennenlernen
- Agglomeratgröße und -festigkeit in Abhängigkeit von
  - ▶ Aufgabenmassenstrom
  - ▶ Flüssigkeitsförderstrom
  - ▶ Feststoff / Flüssigkeitsverhältnis
  - ▶ Tellerdrehzahl
  - ▶ Neigungswinkel des Tellers
  - ▶ Ort der Feststoff- und Flüssigkeitszuführung
  - ▶ gewähltem Feststoff
  - ▶ gewählter Granulierflüssigkeit

## CE 255

### Rollagglomeration



1 Schaltschrank, 2 Feststoff-Dosiereinrichtung, 3 Waage, 4 Druckminderventil, 5 Behälter Granulierflüssigkeit, 6 Behälter Feststoff, 7 Behälter Agglomerate, 8 Granulierteller, 9 Schaber, 10 Zweistoffdüse, 11 Vibrator, 12 Silo Feststoff



1 Silo Feststoff, 2 Vibrator, 3 Feststoff-Dosiereinrichtung, 4 Behälter Agglomerate, 5 Schaber, 6 Granulierteller, 7 Druckminderventil, 8 Zweistoffdüse, 9 Pumpe, 10 Behälter Granulierflüssigkeit; F Durchfluss, P Druck



Agglomerate

#### Spezifikation

- [1] Rollagglomeration mit einem Granulierteller
- [2] Granulierteller mit einstellbarer Drehzahl und verstellbarem Neigungswinkel
- [3] Dosiereinrichtung zur Einstellung des Aufgabenmassenstroms
- [4] Zweistoffdüse zur Zerstäubung der Granulierflüssigkeit mit Druckluft
- [5] Schlauchpumpe zur Einstellung des Flüssigkeitsförderstroms
- [6] Einstellung des Luftdruckes über Druckminderventil
- [7] Positionen der Feststoff- und Flüssigkeitszuführung einstellbar
- [8] Behälter für Feststoff, Granulierflüssigkeit und Agglomerate

#### Technische Daten

##### Granulierteller

- Ø: ca. 400mm
- Randhöhe: ca. 100mm
- Material: Edelstahl

##### Motor für Tellerantrieb

- Leistung: ca. 750W
- Drehzahl: 20...400min<sup>-1</sup>

##### Pumpe

- max. Förderstrom: ca. 428mL/min

##### Behälter

- Silo Feststoff: ca. 10L
- Granulierflüssigkeit: 5L
- Agglomerate: 10L
- Feststoff: 40L

##### Messbereiche

- Durchfluss: 0...100mL/min
- Druck: 0...10bar
- Drehzahl: 4...70min<sup>-1</sup>

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1810x810x1980mm  
Gewicht: ca. 205kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Druckluftanschluss: min. 3bar

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Waage
- 2 Gebinde Kalksteinpulver (50kg)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Lagern und Fließen von Schüttgütern

Als Schüttgüter bezeichnet man allgemein Ansammlungen von Feststoffen, die in Form einzelner Partikel vorliegen. Diese können sehr fein (Pulver) oder grobstückig sein. Beispiele sind Erze, Zement, Nahrungsmittel oder Chemieprodukte. Zur Lagerung von Schüttgütern werden je nach Menge kleinere Behälter, Container oder Silos benutzt. Sie müssen so gestaltet sein, dass sie weder die Produktqualität verschlechtern noch Störungen bei der Entnahme des Schüttguts hervorrufen.

Schüttgüter verhalten sich weder beim Fließen noch während der Lagerung in Ruhe wie Newtonsche Flüssigkeiten. Im Gegen-

satz zu diesen können Schüttgüter auch in Ruhe Schubspannungen übertragen und dementsprechend stabile geneigte Oberflächen bilden. Auch Analogien zum Verhalten von Festkörpern sind in der Regel nicht möglich, z.B. kann ein Schüttgut im Gegensatz zu Festkörpern keine nennenswerten Zugspannungen übertragen.

Zur Beschreibung des Verhaltens von Schüttgütern gibt es deshalb die eigene Disziplin der Schüttgutmechanik, die auf der Bodenmechanik aufbaut.

Typische Phänomene beim Ausfließen eines Schüttguts aus einem Trichter oder Silo sind:

## ■ Massenfluss

Der gesamte Behälterinhalt ist während des Schüttgutaustrags in Bewegung. Ist der Bereich oberhalb des Trichters hinreichend hoch, kommt es dort zu einem gleichmäßigen Absinken über dem Querschnitt (Kolbenfluss).

## ■ Kernfluss

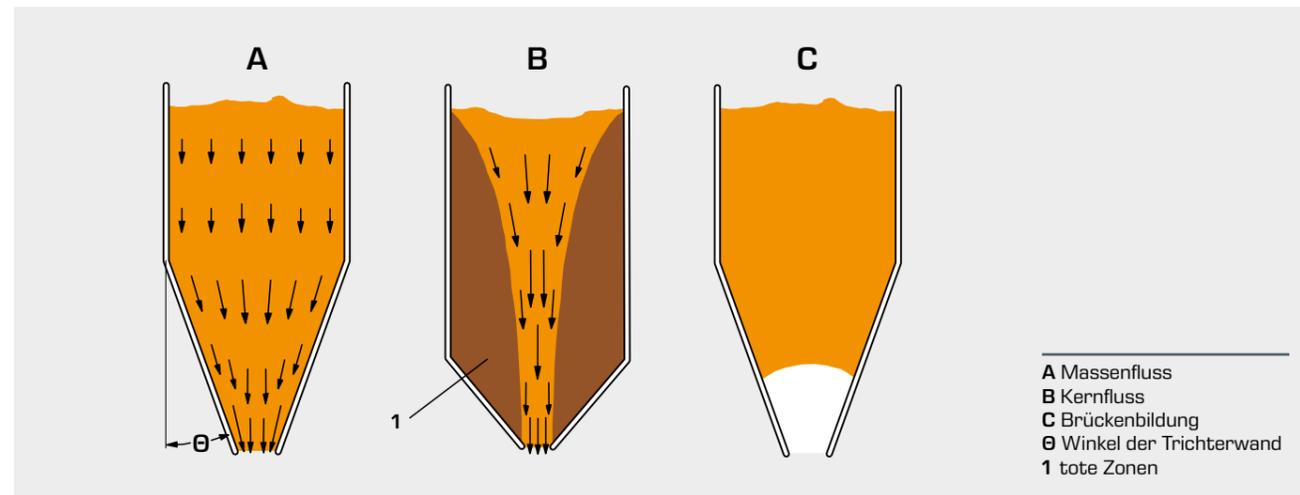
Nur eine begrenzte Zone über der Auslauföffnung, die sich nach oben trichterförmig erweitern kann, ist während des Schüttgutaustrags in Bewegung. Seitlich des fließenden Schüttguts bilden sich sogenannte tote Zonen, in denen das Schüttgut ruht. Es verweilt dort lange und wird erst gegen Ende der Entleerung ausgetragen. Außerdem kann sich das Schüttgut in den toten Zonen bei schlecht fließenden Schüttgütern soweit verfestigen, dass es nicht allein aufgrund der Schwerkraft ausfließt.

## ■ Brückenbildung

Bei schlecht fließenden, kohäsiven Schüttgütern kann sich im Auslauftrichter eine stabile Brücke bilden, worauf der Schüttgutfluss zum Erliegen kommt.

## ■ Entmischung

Beim Füllen von Behältern kann es zur Entmischung kommen, wenn sich die Partikel hinsichtlich Größe, Form oder Dichte unterscheiden. Naturgemäß vermindert die Entmischung die Produktqualität.



Ob Massen- oder Kernfluss vorliegt, hängt von den Fließeigenschaften des Schüttguts und von Wandmaterial und Neigung der Trichterwände ab. Die notwendige Steilheit der Trichterwände kann man unter Kenntnis der Fließeigenschaften berech-

nen. Die Fließeigenschaften misst man mit Schergeräten. Mit diesen Messwerten lässt sich auch die minimale Größe der Auslauföffnung zur Vermeidung von Brückenbildung ermitteln.



# Labor- und Konzeptplanung von A–Z

**Sie planen ein neues Labor?  
Einen neuen Fachraum?  
Einen kompletten Fachbereich?  
Sie wollen modernisieren?**

Dann nutzen Sie unser Know-how und unsere Erfahrung! Unsere Ingenieure planen komplette Labore und staten sie aus. Wir gehen individuell auf Ihre Vorstellungen ein und berücksichtigen dabei das spezifische lokale Umfeld:

- Raumzeichnungen
- Versorgungsanschlüsse
- Ausstattungslisten
- Leistungsbeschreibungen etc.

Für Fragen steht Ihnen unser Außendienst oder Kundenservice gerne zur Verfügung.

## CE 210

### Ausfließen von Schüttgut aus Silos



#### Beschreibung

- **verstellbare Silogeometrie**
- **unterschiedliche Austragsarten: Massenfluss, Kernfluss und Brückenbildung**

Silos werden zur großtechnischen Lagerung der verschiedensten Schüttgüter eingesetzt. Die eingelagerten Schüttgüter sollen anschließend störungsfrei Produktionsprozessen zugeführt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Silo als Massenflusssilo ausgelegt werden.

Der Versuchsstand CE 210 demonstriert praxisnah die unterschiedlichen Austragsarten aus Silos: Massenfluss, Kernfluss und Brückenbildung. Die auftretende Austragsart ist abhängig von den Fließeigenschaften des Schüttguts, der Silogeometrie und des Wandmaterials.

Der Versuchsstand enthält zwei identisch geformte Silos mit transparenten Stirnwänden und unterschiedlichen Wandmaterialien.

Die Silos haben einen keilförmigen Auslauftrichter, dessen Neigung und Breite einstellbar sind. Die Entwicklung des Versuchsstands erfolgte in Zusammenarbeit mit **Prof. Dr. Schulze (Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel)**.

Das Ausflussverhalten wird mit der gemessenen Zeit, der Einwaage an Schüttgut, der Silogeometrie und der beobachteten Austragsart charakterisiert. Mit den erfassten Daten kann die Siloauslegung praktisch überprüft werden, z.B. zusammen mit dem Versuchsgerät CE 200 Fließeigenschaften von Schüttgütern.

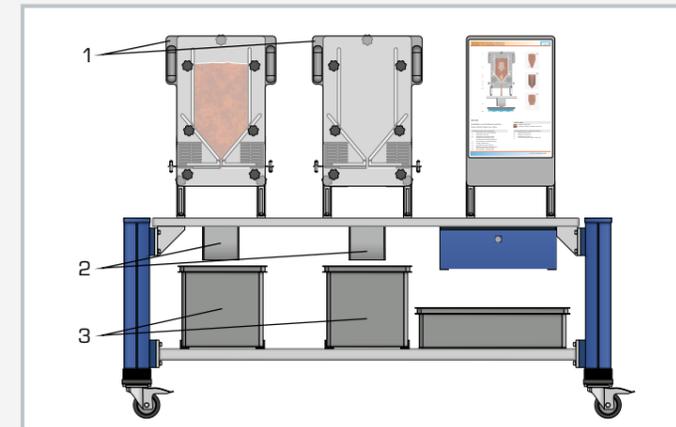
Für die Versuche mit Brückenbildung wird als zusätzliches Schüttgut Mehl (Typ 405) empfohlen.

#### Lerninhalte / Übungen

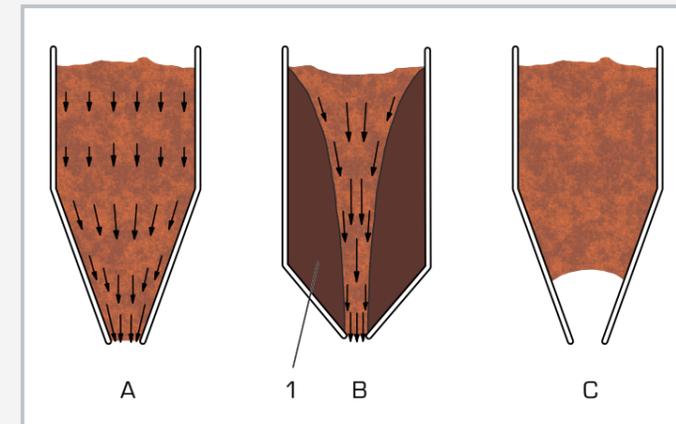
- Einfluss von Wandmaterial und Neigung der Trichterwände auf die Ausflusszeit
- typische Austragsarten bei Silos demonstrieren:
  - ▶ Massenfluss
  - ▶ Kernfluss
  - ▶ Brückenbildung
- Einfluss der Fließeigenschaften auf Ausflusszeit und Fließprofile
- Vergleich verschiedener Schüttgüter
- Überprüfung der Siloauslegung von CE 200

## CE 210

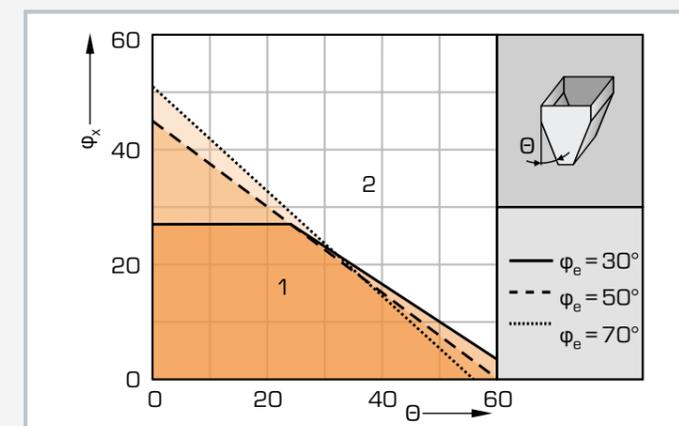
### Ausfließen von Schüttgut aus Silos



1 Silo, 2 Sammeltrichter, 3 Auffangbehälter



A Massenfluss: gesamtes Schüttgut ist in Bewegung  
B Kernfluss: das Schüttgut im Kern ist in Bewegung, das Schüttgut in toten Zonen (1) ruht  
C Brückenbildung: Schüttgutfluss kommt zum Erliegen



Auslegungsdiagramm eines keilförmigen Silos für verschiedene effektive Reibungswinkel  $\phi_e$ . 1 Massenfluss, 2 Kernfluss;  $\phi_x$  Wandreibungswinkel,  $\theta$  Neigung des Auslauftrichters

#### Spezifikation

- [1] Untersuchung des Ausfließens von Schüttgut aus Silos mit keilförmigen Auslauftrichtern
- [2] Demonstration von Brückenbildung, Massenfluss und Kernfluss mit verschiedenen Schüttgütern
- [3] 2 Silos mit unterschiedlichen Trichterwandmaterialien
- [4] Stirnwände der Silos aus transparentem Material
- [5] abnehmbare Silos zur Reinigung
- [6] Winkel der Trichterwand bei gleichbleibenden Auslaufquerschnitt stufenweise verstellbar
- [7] Stampfer zur Verdichtung des Schüttguts
- [8] Stoppuhr zur Bestimmung von Ausflusszeiten
- [9] praktische Überprüfung der Auslegungsergebnisse aus CE 200

#### Technische Daten

- 2 Silos mit keilförmigem Trichter
- Querschnitt Grundkörper: 200x200mm
  - Breite Auslauf: 10...70mm
  - Höhe Siloschaft: ca. 300mm
  - Höhe Trichter: ca. 50...140mm
  - Volumen: ca. 14...18L

- 2 Schüttgüter
- Kunststoffgranulat: 2...5mm
  - Dinkelspelze: 5...15mm

#### Waage

- mit Zuwiegefunktion
- bis 10kg
- Spannungsversorgung: 230V, 50Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase; UL/CSA optional

#### Stoppuhr

- 0...10h

LxBxH: 1830x790x1420mm  
Gewicht: ca. 190kg

#### Für den Betrieb erforderlich

- 1 weiteres Schüttgut (z.B. Mehl Typ 405)

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Aufbewahrungssystem
- 2 Auffangbehälter mit Deckel
- 1 Waage
- 1 Gebinde Kunststoffgranulat (20L)
- 1 Gebinde Dinkelspelze (24L)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 200

### Fließeigenschaften von Schüttgütern



#### Beschreibung

- Ermittlung der Fließeigenschaften von Schüttgütern mit einem Ringschergerät zur Auslegung von Silos
- einfache Handhabung durch unbegrenzten Scherweg
- professionelle Auswertesoftware

Die Fließeigenschaften eines Pulvers oder Schüttguts bestimmen, wie es sich bei der Handhabung verhält. So kann es z.B. bei Silos zum unregelmäßigen Ausfließen bis hin zum Erliegen des Schüttgutflusses kommen. Um diese Probleme in der Praxis zu vermeiden, lassen sich Silos auf der Grundlage von Messungen mit Schergeräten, z.B. Jenike-Schergerät oder Ringschergerät, auslegen.

Beim Ringschergerät befindet sich eine Schüttgutprobe in einer ringförmigen Scherzelle. Über einen Deckel wird eine Normalkraft auf die Probe ausgeübt. Ein Hänger mit veränderlichem Gewicht erzeugt diese Normalkraft. Ein Motor bewegt die Scherzelle relativ zum Deckel, um die Probe auf Scherung zu beanspruchen. Zum Verfestigen (Anscheren) wird die Probe mit einer großen Normalkraft belastet. Ein elektronisch verstärkter Kraftaufnehmer erfasst die Scherkräfte, die dann von einer Datenerfassungssoftware über der Zeit aufgezeichnet werden.

Nach dem Anscheren wird mit einer reduzierten Normalkraft das Abscheren (Messen der Festigkeit) durchgeführt und ebenfalls mit der Software aufgezeichnet. Aus den Scherkraft-Verläufen lassen sich Eigenschaften wie Druckfestigkeit und innere Reibung des Schüttguts bestimmen.

Zur Ermittlung der Schüttgutdichte wird das Volumen der Schüttgutprobe ermittelt, indem die Absenkung des Deckels mit einem Messschieber erfasst wird. Um auch den Einfluss des Materials der Trichterwand auf das Ausflussverhalten zu berücksichtigen, wird eine gesonderte Messung mit einer ringförmigen Probe des Wandmaterials durchgeführt.

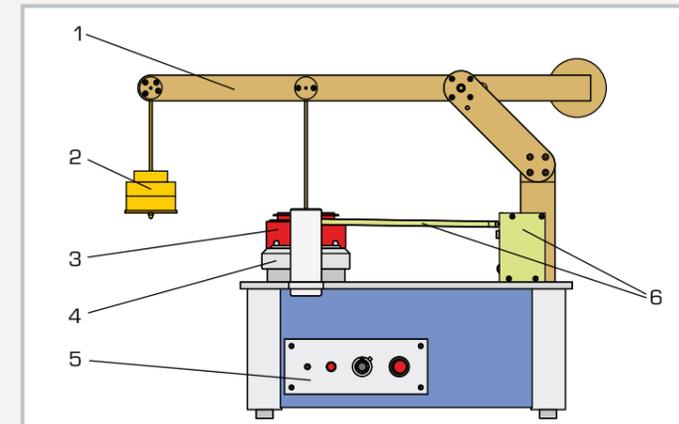
Zur Ermittlung der Fließeigenschaften aus den Versuchsergebnissen steht eine Auswertesoftware zur Verfügung. Mit den ermittelten Fließeigenschaften wird die optimale Geometrie des Auslaufrichters eines Silos bestimmt. Zur praktischen Überprüfung der ermittelten Auslegungsergebnisse bzgl. Massenfluss / Kernfluss steht der Versuchsstand CE 210 zur Verfügung. Das Ringschergerät und die Auswertesoftware wurden von **Prof. Dr. Schulze (Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel)** entwickelt.

#### Lerninhalte / Übungen

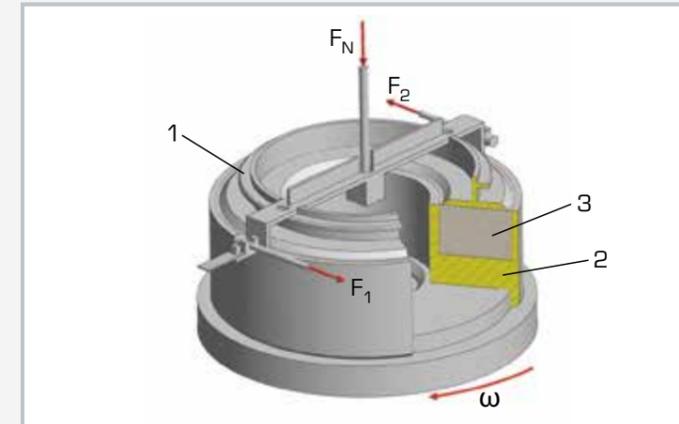
- Aufnahme der Scherkraft-Verläufe von Schüttgütern
- Konstruktion von Fließorten und Wandfließorten
- Ermittlung von Fließeigenschaften
  - ▶ Druckfestigkeit
  - ▶ innere Reibung
  - ▶ Dichte
  - ▶ Wandreibungswinkel
- Bestimmung der optimalen Trichtergeometrie eines Silos für Schüttgut

## CE 200

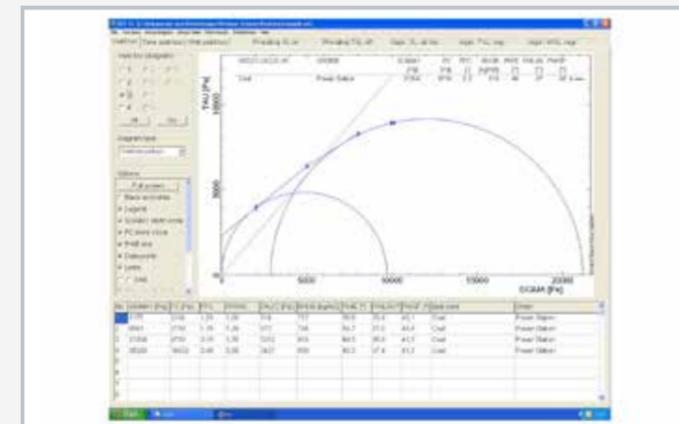
### Fließeigenschaften von Schüttgütern



1 Lastsystem zur Erzeugung der Normalkraft, 2 Gewichte, 3 Scherzelle, 4 Antriebseinheit, 5 Bedienelemente, 6 Kraftaufnehmer (Scherkraft) mit Zugstange



Scherzelle zur Ermittlung von Fließorten: 1 Deckel, 2 Scherzelle, 3 Schüttgut;  $F_1$ ,  $F_2$  Scherkräfte,  $F_N$  Normalkraft,  $\omega$  Drehrichtung der Scherzelle



Screenshot der Auswertesoftware: Fließort mit Mohr'schen Spannungskreisen

#### Spezifikation

- [1] Auslegung von Silos für Schüttgüter mit einem Ringschergerät
- [2] 1 ringförmige Scherzelle zur Ermittlung von Fließorten
- [3] 1 ringförmige Scherzelle mit Probe des Wandmaterials zur Ermittlung von Wandfließorten
- [4] Scheren der Schüttgutprobe durch Drehung der Scherzelle mit einem Motor
- [5] vertikale Belastung der Probe über ringförmigen Deckel mit Gewichten
- [6] Kraftaufnehmer zur Erfassung der Scherkräfte
- [7] Messschieber zur Erfassung der Höhen- und Dichteänderung der Schüttgutprobe
- [8] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10
- [9] GUNT-Software zur Aufnahme der Scherkraft-Verläufe
- [10] Auswertesoftware zur Ermittlung der relevanten Schüttgutparameter

#### Technische Daten

##### Scherzelle

- Probenvolumen: ca. 70cm<sup>3</sup>
- Material: Aluminium

##### Scherzelle mit Probe des Wandmaterials

- Probenvolumen: ca. 15cm<sup>3</sup>
- Material: Aluminium

##### Motor

- Leistungsaufnahme: max. 75W
- Drehzahl: 500...3000min<sup>-1</sup>

##### 1 Satz Gewichte

- 4x 500g
- 2x 200g
- 2x 100g
- 2x 50g

##### Messbereiche

- Kraft: 0...40N
- Waage: 0...1000g

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 400x240x330mm  
Gewicht: ca. 18kg

#### Für den Betrieb erforderlich

PC mit Windows

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 1 Scherzelle
- 1 Scherzelle mit Probe des Wandmaterials
- 1 Messschieber
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 CD mit Auswertesoftware
- 1 Gebinde Schüttgut
- 1 Waage
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

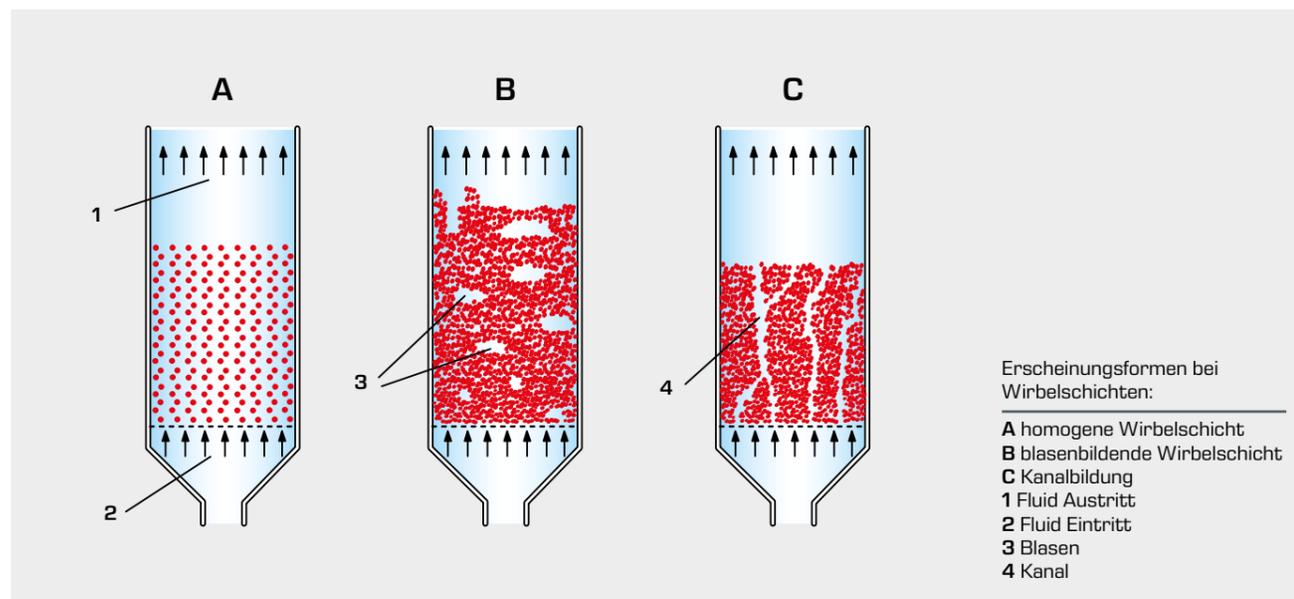
## Basiswissen

## Wirbelschichten

An einer Wirbelschicht sind zwei Phasen beteiligt: ein Feststoff und ein Fluid (Gas oder Flüssigkeit). Wird eine ruhende Schütt-schicht von einem Fluid mit einer ausreichenden Geschwindigkeit (Lockerungsgeschwindigkeit) durchströmt, wird die Schicht soweit aufgelockert, dass einzelne Feststoffpartikel in einen Schwebezustand versetzt werden. Dieser Zustand wird als Fluidisierung bezeichnet. Die so entstandene Wirbelschicht verhält sich strömungstechnisch und thermodynamisch ähnlich wie eine Flüssigkeit. Bei zu großen Geschwindigkeiten werden Partikel aus der Wirbelschicht ausgetragen. Hydraulische oder pneumatische Förderung setzt ein.

Aufgrund der großen Kontaktflächen zwischen Feststoff und Fluid werden Wärme- und Stofftransportprozesse zwischen Partikeln und Fluid, aber auch zwischen den Partikeln untereinander begünstigt.

Ein Anwendungsgebiet ist die Wirbelschichtfeuerung. Dabei findet die Verbrennung in einer Wirbelschicht aus zerkleinertem Brennstoff und heißer Verbrennungsluft statt. Das Wirbelschichtverfahren ermöglicht niedrige Verbrennungstemperaturen. Somit können sehr geringe Stickoxidemissionen eingehalten werden.



Bei Wirbelschichten können folgende Erscheinungsformen auftreten:

#### ■ Homogene Wirbelschicht

Bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Fluids findet eine gleichmäßige Volumenausdehnung der Wirbelschicht statt. Die Feststoffpartikel sind über die gesamte Schicht gleichmäßig verteilt. In der Realität lässt sich ein solches Verhalten nur in Flüssigkeiten bei Verwendung gleich großer Partikel beobachten.

#### ■ Inhomogene Wirbelschicht

In der Wirbelschicht finden Klassier- oder Sortierprozesse statt. Spezifisch schwerere Partikel reichern sich im unteren Bereich an. Bei Verwendung von Gasen als Fluid entstehen in der Wirbelschicht praktisch immer Blasen. Sie sind feststofffrei. Kleinere Blasen vereinigen sich auf dem Weg an die Oberfläche zu größeren Blasen. An der Oberfläche zerplatzen sie. Die Oberfläche der Wirbelschicht wirkt wie eine brodelnde Flüssigkeit.

#### ■ Kanalbildung

Wird als Feststoff ein feinkörniges Schüttgut verwendet und haften die einzelnen Partikel aneinander, kann eine Wirbelschichtbildung ausbleiben. Es bilden sich Strömungskanäle. Eine Durchströmung der umliegenden Bereiche findet nicht statt. Eine Wirbelschichtbildung bei solchen Feststoffen ist nur durch zusätzliches Rühren zu erreichen.

## Basiswissen

## Pneumatische Förderung

Mit pneumatischen Förderanlagen werden pulverförmige und körnige Schüttgüter mit Hilfe eines Gasstroms (meist Luft) in Rohrleitungen transportiert. Bei den Schüttgütern kann es sich beispielsweise um Lebensmittel wie Mehl oder Hülsenfrüchte handeln.

Pneumatische Förderanlagen bestehen im Wesentlichen aus einem Gebläse, einer Förderleitung und einem Staubabscheider (z.B. Gaszyklon). Die Förderung kann horizontal, vertikal und schräg erfolgen.

Die Förderleitung kann an der Saugseite (Saugförderung) oder auf der Druckseite (Druckförderung) des Gebläses angeschlossen werden. Es gibt auch kombinierte Saug-Druck-Anlagen. Saugförderanlagen arbeiten aufgrund des Unterdrucks völlig staubfrei, da durch den Unterdruck im System keine Staubluft austreten kann. Mit Druckförderanlagen können größere Höhenunterschiede und Entfernungen überwunden werden als mit Saugförderanlagen.

Je nach Geschwindigkeit und Feststoffgehalt des Luftstroms können in **horizontalen** Rohrleitungen unterschiedliche Förderzustände auftreten:

#### ■ Flugförderung (Dünnstromförderung)

Bei großen Geschwindigkeiten bewegen sich die Feststoffpartikel gleichmäßig über den Querschnitt verteilt durch Leitung. Partikel prallen gegeneinander oder gegen die Rohrwand.

#### ■ Strähnenförderung

Wird die Geschwindigkeit bei gleichbleibendem Feststoffgehalt verringert, reicht die Energie der Strömung nicht mehr aus, um den gesamten Feststoff in Schwebe zu halten. Ein Teil der Feststoffpartikel gleitet als Strähne am Rohrboden. Der andere Teil wird fliegend über der Strähne transportiert.

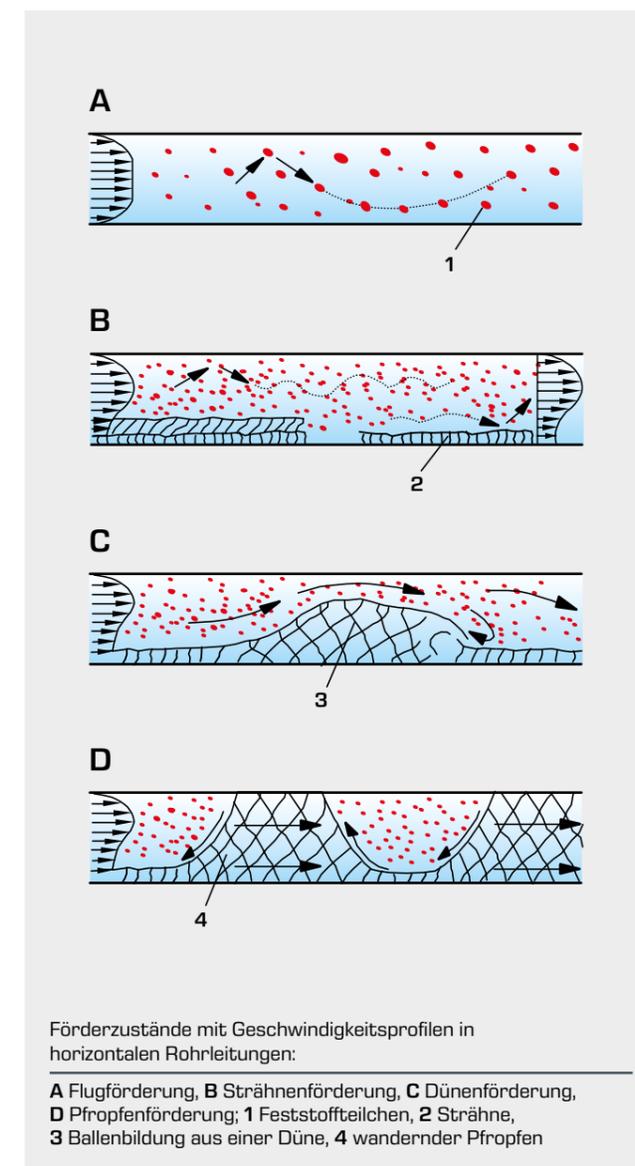
#### ■ Dünenförderung (Dichtstromförderung)

Wird die Geschwindigkeit weiter abgesenkt, bewegen sich die Feststoffpartikel wie eine Düne. Partikel werden über die Kuppe der Düne bewegt und lagern sich in deren Windschatten ab. Aus den Dünen können sich bei weiterer Geschwindigkeitsabsenkung Ballen bilden, die einen großen Teil des Rohrquerschnitts einnehmen.

#### ■ Pfropfenförderung (Dichtstromförderung)

Bei sehr geringen Geschwindigkeiten nehmen die Ballen den gesamten Rohrquerschnitt ein und es bilden sich Pfropfen. Ballen und Pfropfen kommen nur sehr langsam voran. Hat das Gebläse nicht genug Druckreserven, können Ballen- und Pfropfenförderung schnell zum Verstopfen der Rohrleitung führen.

In **vertikalen** Rohren treten im Prinzip die gleichen Förderzustände auf. Jedoch hat die Schwerkraft in diesem Fall einen größeren Einfluss.



## CE 220 Wirbelschichtbildung



### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen zur Fluidisierung von Schütttschichten
- Beobachtung und Vergleich des Fluidisierungsprozesses in Wasser und Luft
- Druckverluste abhängig von der
  - ▶ Strömungsgeschwindigkeit
  - ▶ Art und der Partikelgröße der Schüttung
- Bestimmung der Lockerungsgeschwindigkeit und Vergleich mit theoretisch errechneten Werten (Ergun-Gleichung)
- Abhängigkeit der Höhe der Wirbelschicht von der Strömungsgeschwindigkeit
- Überprüfung der Carman-Kozeny-Gleichung

### Beschreibung

- **experimentelle Untersuchung des Fluidisierungsprozesses**
- **Vergleich der Wirbelschichtbildung in Gasen und Flüssigkeiten**
- **Druckverluste in Festbett und Wirbelschicht**

Wenn eine Schüttung aus Feststoffpartikeln mit Flüssigkeiten oder Gasen durchströmt wird und das Festbett sich soweit auflockert, dass die Feststoffpartikel frei beweglich werden, wird die Schütttschicht in eine Wirbelschicht überführt. Zur Charakterisierung einer Wirbelschicht kann der Druckverlust des hindurchströmenden Fluids herangezogen werden. Typische Anwendungsgebiete für Wirbelschichten sind z.B. die Trocknung von Feststoffen oder Röst- und Verbrennungsprozesse.

Mit CE 220 wird die Wirbelschichtbildung in Wasser und Luft beobachtet.

Die feste, disperse Phase oberhalb einer porösen Sinterplatte wird von unten durch die kontinuierliche Phase (Wasser oder Luft) durchströmt. Ist die Geschwindigkeit des Fluids geringer als die sogenannte Lockerungsgeschwindigkeit, wird die Schütttschicht lediglich durchströmt, ohne dass die Partikel bewegt werden. Dieser Zustand wird als Festbett bezeichnet. Bei größeren Geschwindigkeiten wird die Schicht aufgelockert und die Partikel werden beweglich. Damit wird das Festbett zum Fließbett und die Schütttschicht zur Wirbelschicht. Die Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer vertikalen Ausdehnung der Wirbelschicht. Bei ausreichend hoher Geschwindigkeit werden die Partikel aus der Wirbelschicht ausgetragen.

In der Praxis werden die Partikel z.B. in Rohren transportiert. In CE 220 halten Filter bzw. Sinterplatte die Partikel zurück.

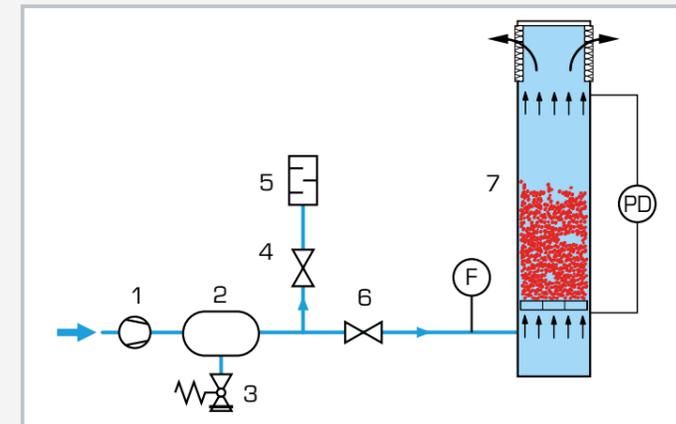
Die Ströme der Fluide werden an Schwebekörper-Durchflussmessern abgelesen. Der Wasserdurchfluss wird über die Drehzahl der Pumpe eingestellt. Der Luftvolumenstrom kann über ein separates Drosselventil eingestellt werden. Zur Messung der Druckverluste ist ein elektronisches Handmessgerät im Lieferumfang enthalten. Die Höhe der Wirbelschichten wird an den Skalen der Behälter abgelesen.

Die Behälter sind herausnehmbar, so dass die Schüttung einfach ausgewechselt werden kann. Als Schüttung werden Glasstrahlperlen in unterschiedlichen Partikelgrößen mitgeliefert.

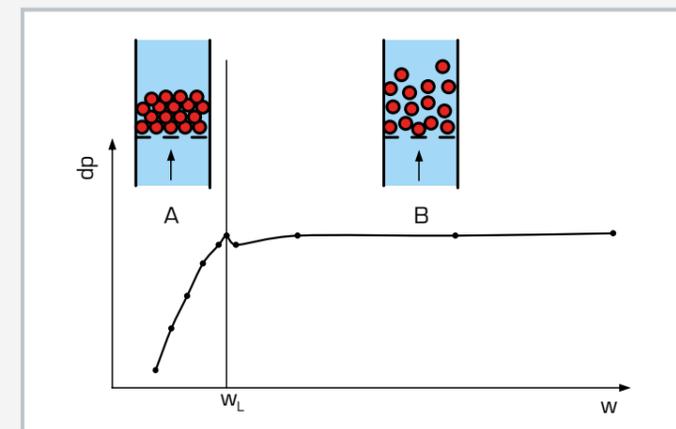
## CE 220 Wirbelschichtbildung



1 Wasserüberlauf, 2 Behälter für Wasser, 3 Schwebekörper-Durchflussmesser für Wasser, 4 Handmessgerät Druckverlust, 5 Schwebekörper-Durchflussmesser für Luft, 6 Behälter für Luft, 7 Filter



Versuchsaufbau für Wirbelschichtbildung mit Luft  
1 Membranverdichter, 2 Druckluftspeicher, 3 Sicherheitsventil, 4 Bypassventil, 5 Schalldämpfer, 6 Nadelventil, 7 Behälter (Luft); F Durchfluss, PD Differenzdruck



Druckverlust einer mit Luft durchströmten Wirbelschicht  
dp Druckverlust, w Fließgeschwindigkeit,  $w_L$  Lockerungsgeschwindigkeit; A Schütttschicht (Festbett), B Wirbelschicht (Fließbett)

### Spezifikation

- [1] Untersuchung des Überganges von Schütttschicht zur Wirbelschicht
- [2] Versuche mit Luft und Wasser nebeneinander
- [3] beide Behälter herausnehmbar
- [4] Skalen auf den Behältern zur Messung der Wirbelschichthöhe
- [5] Wasserversorgung über Vorratsbehälter mit Membranpumpe
- [6] Druckluftversorgung über Druckluftspeicher und Membranverdichter
- [7] Volumenstrom für Luft über Ventile einstellbar
- [8] Durchfluss für Wasser über Drehzahl der Membranpumpe einstellbar
- [9] Messung der Druckverluste mit elektronischem Handmessgerät

### Technische Daten

- 2 Behälter
- Länge: 380mm
  - Ø innen: 44mm
  - Teilung Skala: 1mm
  - Material: PMMA
- Membranpumpe (Wasser)
- max. Förderstrom: 1,7L/min
  - max. Förderhöhe: 70m
- Membranverdichter (Luft)
- max. Volumenstrom: 39L/min
  - max. Druck: 2bar

Vorratsbehälter Wasser: ca. 5,5L  
Druckluftbehälter: 2L

### Messbereiche

- Druck: 0...200mmWS
- Durchfluss: 0,2...1,6L/min (Wasser)
- Volumenstrom: 4...33NL/min (Luft)
- Höhe: 25...370mm

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 750x610x1010mm  
Gewicht: ca. 80kg

### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (180...300µm; 1kg)
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (420...590µm; 1kg)
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 222

### Vergleich von Wirbelschichten



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen der Fluidisierung von Schüttschichten
- Wirbelschichtbildung mit Luft
- Druckverluste in Abhängigkeit von
  - ▶ Leerrohrgeschwindigkeit
  - ▶ Partikelgröße
  - ▶ Partikeldichte
  - ▶ Schüttschichthöhe
- Bestimmung der Fluidisierungsgeschwindigkeit und Vergleich mit theoretisch errechneten Werten (Ergun-Gleichung)
- Abhängigkeit der Höhe der Wirbelschicht von der Strömungsgeschwindigkeit
- Überprüfung der Carman-Kozeny-Gleichung

#### Beschreibung

- zwei transparente Kolonnen mit unterschiedlichen Durchmessern zur Beobachtung der Wirbelschichtbildung in Gasen
- Druckverlust in Schütt- und Wirbelschichten

Schüttschichten können beim Durchfließen von Gasen von der vorliegenden Form einer Schüttschicht (Festbett) in eine Wirbelschicht (Fließbett) überführt werden. Die Anwendungsgebiete für Wirbelschichten sind beispielsweise die Trocknung von Feststoffen, Feuerungen und die Beschichtung von Partikeln.

Dieser Versuchsstand ist in Zusammenarbeit mit der **University of Greenwich, UK**, entwickelt worden. CE 222 beinhaltet zwei transparente Kolonnen mit unterschiedlichen Durchmessern für die Wirbelschichtbildung mit Druckluft als Gas. Eine Skalierung auf den Kolonnen zeigt die Höhe der Schütt- bzw.

Wirbelschicht an. Über Magnetventile wird die zu untersuchende Kolonne mit Druckluft versorgt. Es kann eine Kolonne zur Zeit betrieben werden. Die Kolonnen sind für den Wechsel der Schüttschicht herausnehmbar. Als Schüttung werden Glasstrahlperlen in unterschiedlichen Partikelgrößen mitgeliefert.

Zu Beginn der Versuche ruht auf einer Sinterplatte am Boden der Kolonne eine Schüttschicht. Druckluft strömt aufwärts durch die Kolonne und tritt am Luftfilter aus. Ist die Geschwindigkeit der Luft geringer als die sogenannte Lockungsgeschwindigkeit, wird die Schüttschicht lediglich durchströmt. Bei größeren Geschwindigkeiten wird die Schüttschicht soweit aufgelockert, dass die Partikel in einen Schwebezustand versetzt werden. Die Schüttschicht wird in eine Wirbelschicht

überführt. Wird die Geschwindigkeit weiter erhöht, werden Partikel aus der Wirbelschicht ausgetragen (Förderung). Der Luftfilter am Kopf der Kolonne hält diese Partikel zurück.

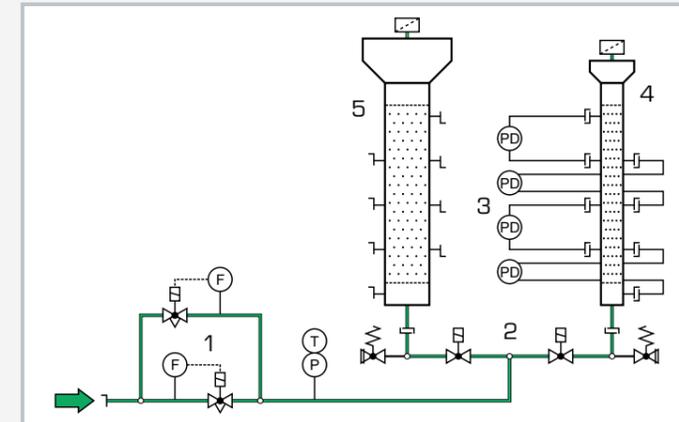
Der Volumenstrom der Druckluft wird mit zwei Messbereichen gemessen und geregelt. An beiden Kolonnen befinden sich Messstellen für den Anschluss von Differenzdruckaufnehmern, die den Druckverlust in Schütt- und Wirbelschicht erfassen. Die Messwerte werden über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der mitgelieferten Software angezeigt. Die Bedienung des Versuchsstands erfolgt über die Gunt-Software. Für den Betrieb ist eine externe Druckluftversorgung erforderlich.

## CE 222

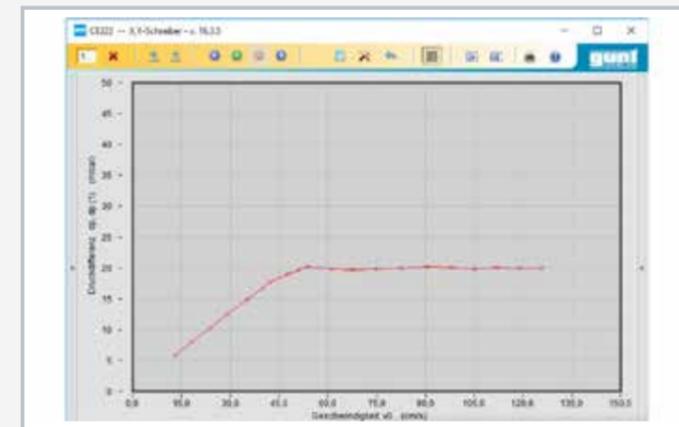
### Vergleich von Wirbelschichten



1 Kolonne K1 mit Ø 100mm, 2 Kolonne K2 mit Ø 50mm, 3 Differenzdruckmesspunkte von K1, 4 Gasversorgung von K1, 5 Gasversorgung des Versuchsstands, 6 Durchflussmessung für 2 Messbereiche



1 Durchflussmessung, 2 Kolonnenumschaltung, 3 Differenzdruckmessung, 4 Kolonne K2 mit Ø 50mm, 5 Kolonne K1 mit Ø 100mm



Screenshot der Software: Messergebnisse im X,Y-Schreiber

#### Spezifikation

- [1] Untersuchung der Wirbelschichtbildung von Feststoffen in Gas
- [2] 2 herausnehmbare, transparente Kolonnen mit unterschiedlichen Durchmessern
- [3] Magnetventile zur Auswahl der zu untersuchenden Kolonne
- [4] jede Kolonne mit Sinterplatte, Skalierung, Luftfilter
- [5] jede Kolonne mit 4 Differenzdruckmessstellen in Schütt- und Wirbelschicht zur Bestimmung der Druckverluste
- [6] Volumenstromregelung mit 2 Messbereichen
- [7] Glasstrahlperlen in unterschiedlichen Partikelgrößen als Schüttung
- [8] GUNT-Software mit Steuerungsfunktionen und Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

#### Technische Daten

- 2 Kolonnen
- Länge: 500mm
  - Ø 1x 50mm, 1x 100mm
  - Material: Glas
  - Skalierung, Teilung: 1mm

#### Messbereiche

- Durchfluss: 1x 1,8...18L/min, 1x 15...150L/min
- Differenzdruck: 4x 0...50mbar
- Druck: 0...2,5bar
- Temperatur: 0...60°C

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1400x800x1700mm  
Gewicht: ca. 132kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Druckluft (1,8...150L/min, 5bar)  
PC mit Windows

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (180...300µm; 2kg)
- 1 Gebinde Glasstrahlperlen (420...590µm; 2kg)
- 1 Satz Zubehör
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 250

### Pneumatische Förderung



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip und Betriebsverhalten einer pneumatischen Förderanlage kennenlernen
- Beobachtung unterschiedlicher Förderzustände, abhängig von Feststoffgehalt und Luftgeschwindigkeit
- Bestimmung der Schwebegeschwindigkeit des Feststoffs
- Bestimmung des Feststoffgehalts des Förderstroms
- Druckverlust in Abhängigkeit des Feststoffgehalts und der Luftgeschwindigkeit

#### Beschreibung

- aufwärtsgerichtete, pneumatische Druckförderung von Feststoffen in einer vertikalen Rohrstrecke
- transparente Rohrleitungen und Behälter zur Beobachtung unterschiedlicher Förderzustände
- praxiserfahrene Versuche im Labormaßstab

Mit pneumatischen Förderanlagen können disperse Feststoffe über große Distanzen in Rohrleitungen transportiert werden.

Der Feststoff wird aus einem Aufgabehälter über eine Vibrationsrinne in einen Luftstrom transportiert. Eine austauschbare Injektordüse dispergiert den Feststoff im Luftstrom. Der Luftstrom transportiert den Feststoff in der Rohrleitung aufwärts. Die Förderung endet in einem Auffangbehälter.

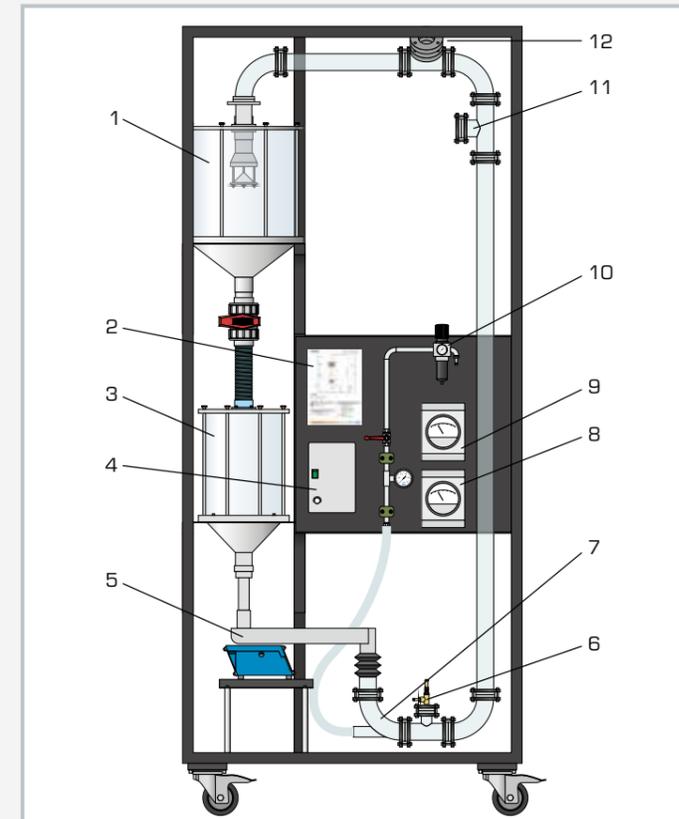
Je nach Geschwindigkeit und Feststoffgehalt des Luftstroms können unterschiedliche Förderzustände auftreten. Bei großen Geschwindigkeiten wird der Feststoff gleichmäßig über den Querschnitt der Förderleitung verteilt (Flugförderung). Bei Verringerung der Geschwindigkeit bilden sich an der Rohrwand Strahlen und Ballen, die wegen ihrer höheren Sinkgeschwindigkeit abwärts rutschen. Die Strahlen und Ballen lösen sich im Luftstrom ständig wieder auf und bilden sich neu. Eine Absenkung der Geschwindigkeit unterhalb der Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel führt schließlich zur Pfropfenförderung. Die unterschiedlichen Förderzustände können durch das transparente Material der Rohrleitung beobachtet werden.

Zur Feststellung der Druckverluste und der Strömungsgeschwindigkeit sind an allen relevanten Positionen Messpunkte vorgesehen. Die Geschwindigkeit des Luftstroms wird an einem Druckregler eingestellt. Der Feststoffmassenstrom kann über die Schwingweite der Vibrationsrinne an einem Potentiometer eingestellt werden. Die Druckluftversorgung muss laborseitig bereitgestellt werden.

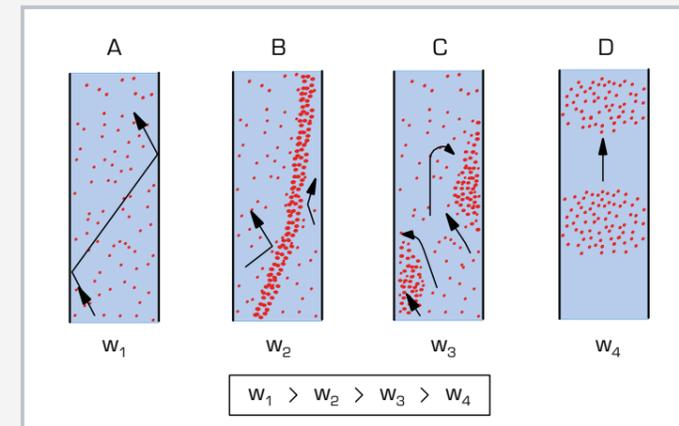
Als Feststoff werden Erbsen oder Kunststoffgranulat empfohlen.

## CE 250

### Pneumatische Förderung



1 Auffangbehälter, 2 Prozessschema, 3 Aufgabehälter, 4 Bedienelemente für Vibrationsrinne, 5 Vibrationsrinne, 6 Druckmesspunkt, 7 Injektordüse, 8 Anzeige Differenzdruck, 9 Anzeige Geschwindigkeit, 10 Präzisionsdruckregler, 11 Messpunkt Geschwindigkeit (Pitot-Rohr), 12 Druckmesspunkt



Förderzustände bei vertikaler Förderung: A Flugförderung, B Strahlenförderung, C Ballenförderung, D Pfropfenförderung; w Luftgeschwindigkeit

#### Spezifikation

- [1] aufwärtsgerichtete, pneumatische Druckförderung von Feststoffen in einer vertikalen Rohrstrecke
- [2] Aufgabe des Feststoffs in den Luftstrom über Vibrationsrinne mit einstellbarer Schwingweite
- [3] 4 austauschbare Injektordüsen zur Dispergierung des Aufgabeguts in den Luftstrom
- [4] vertikale Rohrstrecke aus Glas
- [5] Auffangbehälter und Aufgabehälter aus transparentem Material (PMMA)
- [6] Auffang- und Aufgabehälter durch Rohrleitung mit Hahn verbunden
- [7] Präzisionsdruckregler zur Einstellung des Eingangsdrucks und des Volumenstroms
- [8] Messpunkte für Druckverluste und Fließgeschwindigkeit

#### Technische Daten

vertikale Rohrstrecke  
 ■ Höhe: 2m  
 ■ Durchmesser: 50mm

Behälter  
 ■ Aufgabe: 20L  
 ■ Auffang: 40L

Messbereiche  
 ■ Geschwindigkeit: 0...36m/s  
 ■ Differenzdruck: 0...10kPa  
 ■ Druck: 0...1bar

230V, 50Hz, 1 Phase  
 120V, 60Hz, 1 Phase  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1280x800x2880mm  
 Gewicht: ca. 190kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Druckluft: min. 1500mbar, 60m<sup>3</sup>/h

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 4 Düsen
- 1 Gebinde Kunststoffgranulat (PP; 30kg)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Einführung

<b>Übersicht</b> Die GUNT-Lernkonzepte zur Thermischen Verfahrenstechnik	086
--	-----

## Trocknung und Verdampfung

<b>Basiswissen</b> Trocknung	088
<b>Basiswissen</b> Verdampfung	089
<b>CE 130</b> Konvektionstrocknung	090
<b>CE 715</b> Steigfilmverdampfung	092

### Grundverfahren der Thermischen Verfahrenstechnik im Versuch erarbeiten

Wir bieten Ihnen das komplette Programm zur versuchstechnischen Erarbeitung der Grundverfahren der Thermischen Verfahrenstechnik.

Unsere Versuchsstände vereinfachen das Verständnis der komplexen, theoretischen Grundlagen, auf denen die thermischen Trennverfahren beruhen. Die Triebkräfte und die Auswirkungen der zur Trennung notwendigen Wärme- und Stofftransportprozesse werden sichtbar und erfahrbar. Auf diese Weise wird der Lernende auf den verantwortungsbewussten Umgang mit realen Anlagen vorbereitet. Ein effektiver Lernprozess wird in vielen Fällen durch eine Software zur Datenerfassung unterstützt.

## Destillation / Rektifikation

<b>Basiswissen</b> Destillation	094
<b>Basiswissen</b> Rektifikation	095
<b>Übersicht</b> CE 600 Kontinuierliche Rektifikation	096
<b>CE 600</b> Kontinuierliche Rektifikation	098
<b>CE 602</b> Diskontinuierliche Rektifikation	100
<b>CE 610</b> Vergleich von Rektifikationskolonnen	102

## Absorption und Adsorption

<b>Basiswissen</b> Absorption	104
<b>Basiswissen</b> Adsorption	105
<b>Übersicht</b> CE 400 Gasabsorption	106
<b>CE 400</b> Gasabsorption	108
<b>CE 405</b> Fallfilmabsorption	110
<b>CE 540</b> Adsorptive Lufttrocknung	112
<b>Übersicht</b> CE 583 Adsorption	114
<b>CE 583</b> Adsorption	116

## Kristallisation und Membrantrennverfahren

<b>Basiswissen</b> Kristallisation	118
<b>Basiswissen</b> Membrantrennverfahren	119
<b>CE 520</b> Kühlungskristallisation	120
<b>CE 530</b> Umkehrosmose	122

## Extraktion

<b>Basiswissen</b> Flüssig-Flüssig-Extraktion	124
<b>Basiswissen</b> Fest-Flüssig-Extraktion	125
<b>CE 620</b> Flüssig-Flüssig-Extraktion	126
<b>CE 630</b> Fest-Flüssig-Extraktion	128

## Stoffübertragung

<b>Basiswissen</b> Stoffübertragung	130
<b>CE 110</b> Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen	132

# Die GUNT-Lernkonzepte zur Thermischen Verfahrenstechnik

## Womit beschäftigt sich die Thermische Verfahrenstechnik?

Gegenstand der Thermischen Verfahrenstechnik sind thermische Trennprozesse. In Stoffgemischen aus mindestens zwei Komponenten wird durch Wärme- und Stofftransportprozesse die Zusammensetzung (Konzentration) des Gemisches gezielt verändert. Die Triebkräfte (Temperatur- und Konzentrationsunterschiede) für diese Transportprozesse werden durch Hinzufügen

gen einer für eine oder mehrere Komponenten des Gemisches selektiven Gegenphase aufgebaut. Sowohl die zu trennenden Stoffgemische als auch die Gegenphase können fest, flüssig oder gasförmig sein. Die Prozesse werden als Phasengleichgewichtsprozesse bezeichnet und nach der Kombination der Phasen systematisiert.

## Wie lassen sich die Grundverfahren der Thermischen Verfahrenstechnik einteilen?

Phasengleichgewichtsprozesse			
flüssig / gasförmig	Verdampfung	Destillation/Rektifikation	Absorption
flüssig / flüssig	Extraktion	Membrantrennverfahren/Umkehrosmose	
fest / flüssig		Kristallisation	Adsorption
fest / gasförmig	Trocknung		

Die Modellierung thermischer Trennprozesse basiert auf den unbedingt geltenden Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls, auf den unbedingt geltenden Phasengleichgewichten und auf den kinetischen Ansätzen für die Modellierung der Wärme und Stofftransportgeschwindigkeiten. Die Parameter in den Kinetikansätzen müssen gemessen und die Wärme- und Stofftransportgeschwindigkeiten optimiert werden. Für das umfassende Verständnis der sich wiederholenden verfahrenstechnischen Grundprinzipien, wie z. B. Gleich- oder Gegenstromführung, Mehrstufenprozesse, Gestaltung aktiver Flächen oder gleichmäßiger Triebkraftverlauf, sind praktische Versuche unverzichtbar. Die notwendige Kreativität bei der Planung, dem Aufbau und der Durchführung von Versuchen zur Modellparameterbestimmung ist anschaulich und verständlich nur an Versuchsgeräten zu vermitteln.



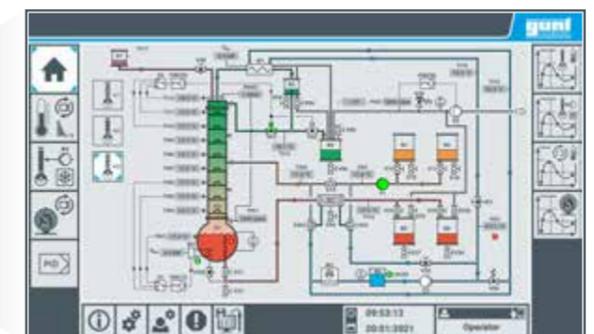
Prof. Dr.-Ing. habil. Kurt Gramlich (Hochschule Anhalt), unser technischer Berater für die Thermische Verfahrenstechnik

Prof. Gramlich hat uns beim Aufbau dieses Programms beraten und dabei seine langjährige Lehrerfahrung im Bereich der Thermischen Verfahrenstechnik eingebracht.

Die Texte auf dieser Seite wurden von Prof. Gramlich verfasst.

## Unsere Lehrsysteme für die Thermische Verfahrenstechnik

Trocknung	CE 130 Konvektionstrocknung
Verdampfung	CE 715 Steigfilmverdampfung
Destillation / Rektifikation	CE 600 Kontinuierliche Rektifikation CE 602 Diskontinuierliche Rektifikation CE 610 Vergleich von Rektifikationskolonnen
Absorption	CE 400 Gasabsorption CE 405 Fallfilmabsorption
Adsorption	CE 540 Adsorptive Lufttrocknung CE 583 Adsorption
Extraktion	CE 620 Flüssig-Flüssig-Extraktion CE 630 Fest-Flüssig-Extraktion
Kristallisation	CE 520 Kühlungskristallisation
Membrantrennverfahren	CE 530 Umkehrosmose
Stoffübertragung	CE 110 Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen



Bedienoberfläche des Touchscreen

CE 600  
Kontinuierliche  
Rektifikation

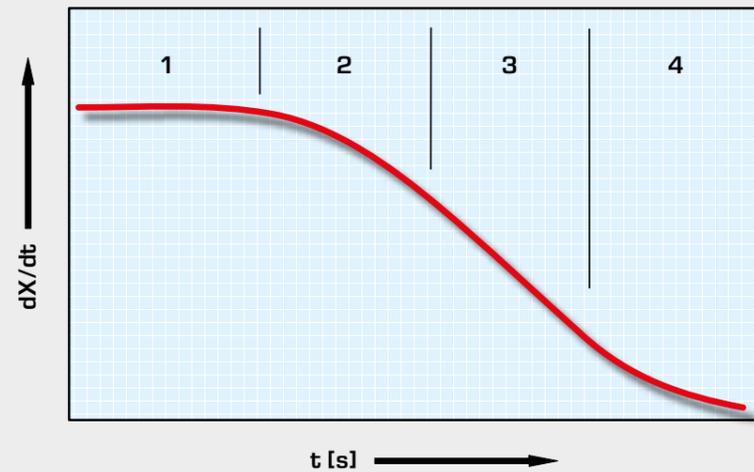
## Basiswissen

## Trocknung

Unter Trocknung ist allgemein die Abtrennung von Feuchtigkeit aus Feststoffen, Gasen oder Flüssigkeiten zu verstehen. Zur Trocknung von Gasen und Flüssigkeiten wird meist Adsorption eingesetzt. Ein typischer Einsatzbereich für die Trocknung von Feststoffen ist die Lebensmitteltechnik.

Bei der thermischen Trocknung von Feststoffen wird dem Gut Feuchtigkeit durch Verdunstung oder Verdampfung entzogen. Dabei hängt der Verlauf der Trocknung davon ab, wie die Feuch-

tigkeit in dem Gut vorliegt. Zu Beginn verdunstet bzw. verdampft zunächst die an der Oberfläche des Trockengutes anhaftende Flüssigkeit. Ist diese Flüssigkeit entfernt, beginnt die Trocknung der in den Kapillaren und Poren enthaltenen Feuchtigkeit. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt dabei aufgrund der notwendigen Überwindung der Kapillarkräfte bzw. Diffusionswiderstände ab. Im Kristallgefüge gebundenes Kristallwasser kann nur durch starke Erwärmung und bei geringen Trocknungsgeschwindigkeiten entfernt werden.



Trocknungsverlauf eines Feststoffes mit Angabe von Trocknungsabschnitten (1-4):

$dX/dt$  Trocknungsgeschwindigkeit,  $X$  Feuchtegehalt [kg (Wasser) / kg (Feststoff trocken)],  $t$  Trocknungszeit;  
1 Oberflächenfeuchtigkeit, 2 Kapillarfeuchtigkeit, 3 Porenfeuchtigkeit, 4 Feuchtigkeit im Kristallverbund

Aufgrund der Vielzahl verschiedenartiger, technisch wichtiger Feuchtgüter mit teilweise extrem unterschiedlichem Trocknungsverhalten werden in der Trocknungstechnik sehr viele verschiedene verfahrenstechnische Prinzipien genutzt.

## Folgende Grundverfahren lassen sich unterscheiden:

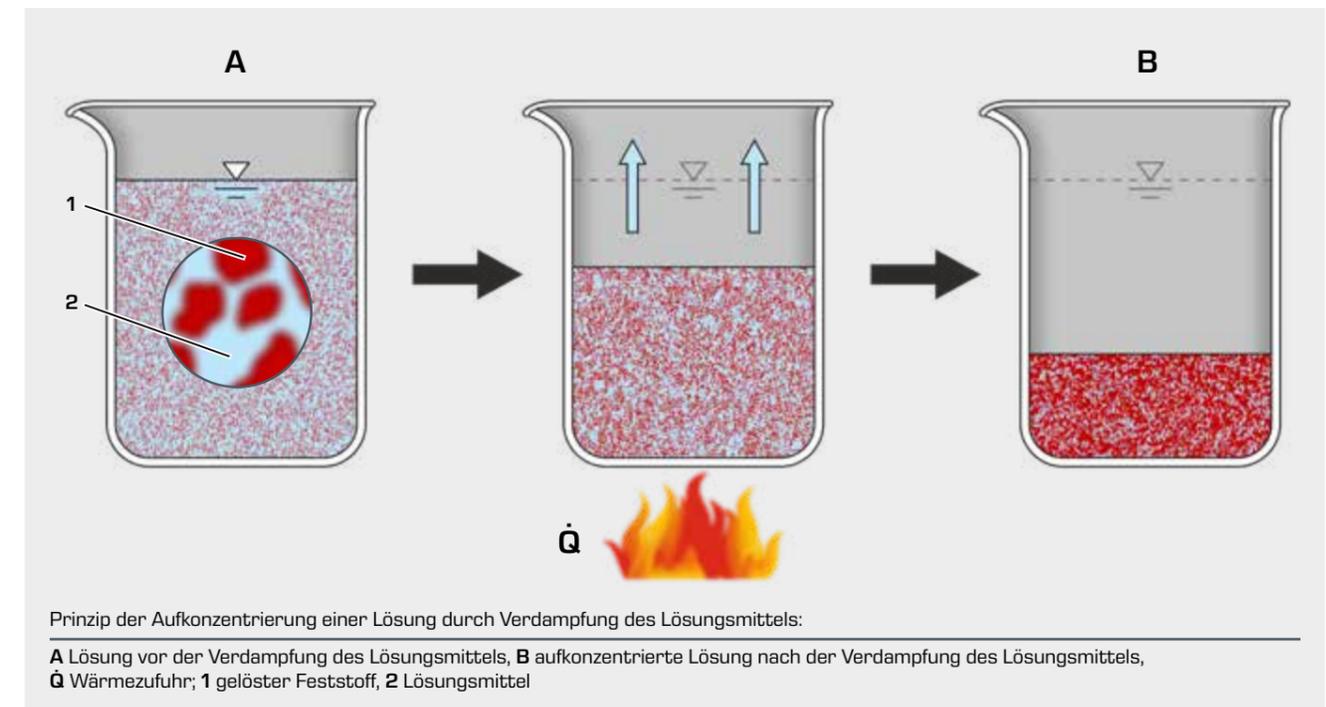
- **Konvektionstrocknung**  
Ein strömendes Gas überträgt die zur Trocknung nötige Wärme durch Konvektion an das Trockengut. Das Gas dient neben der Wärmezufuhr auch dem Abtransport der vom Gut abgegebenen Feuchtigkeit.
- **Kontaktstrocknung**  
Das Trockengut liegt auf beheizten Flächen oder wird über heiße Flächen geführt. Die Wärme wird überwiegend durch Leitung auf das Gut übertragen.
- **Strahlungstrocknung**  
Das Trockengut absorbiert von Strahlungsquellen (z.B. Infrarotstrahlern) emittierte elektromagnetische Strahlung. Die Aufheizung und Verdampfung erfolgt dabei nicht nur an der Oberfläche des Gutes, sondern auch in seinem Innern.
- **Gefriertrocknung**  
Aus dem gefrorenen, feuchten Gut wird die Feuchte im Vakuum unterhalb des Tripelpunktes direkt aus dem festen in den dampfförmigen Zustand überführt.
- **Hochfrequenzstrocknung**  
Das Trockengut wird zwischen den Elektroden eines Plattenkondensators hochfrequenten, elektrischen Feldern ausgesetzt. Ein Teil der Feldenergie wird vom Gut absorbiert. Es heizt sich in Folge dessen im Innern auf und die Feuchtigkeit wird entfernt.

## Basiswissen

## Verdampfung

Unter Verdampfung im Sinne der thermischen Verfahrenstechnik versteht man die Abtrennung des Lösungsmittels aus einer Lösung. Ein Beispiel für eine Lösung ist Salzwasser, bei dem ein Salz als gelöster Feststoff in dem Lösungsmittel Wasser vor-

liegt. Durch Wärmezufuhr wird ausschließlich das Lösungsmittel (im Beispiel Wasser) aus der Lösung verdampft und weggeführt. Die zurückbleibende Lösung besitzt somit eine höhere Konzentration an gelöstem Feststoff (Salz) als vor der Wärmezufuhr.



Ziel des Verdampfens kann die Gewinnung des Lösungsmittels, die Erzeugung einer konzentrierten Lösung sowie das Ausfällen des gelösten Feststoffes durch Kristallisation sein.

## Industrielle Anwendungen der Verdampfung sind:

- Aufkonzentrierung von Salzlösungen, Laugen, Säuren, Kunststofflösungen, Obst- und Gemüsesäften, Milch u. a.
- Gewinnung von Produkten wie z. B. Zucker aus Dünnsaft, Salz aus Sole, Trinkwasser aus Meerwasser.

Je nach Ziel des Trennverfahrens werden unterschiedliche Bauarten von Verdampfern eingesetzt. Grundsätzlich handelt es sich dabei um Wärmeübertrager, bei denen als Heizmedium meistens Heißdampf eingesetzt wird. Die Lösung kann die Verdampferrohre einmalig (Durchflussverdampfer) oder auch mehrmals durchlaufen (Umlaufverdampfer). Für Lösungen, die temperaturempfindliche Stoffe enthalten, werden Dünnschichtverdampfer verwendet. Sie begrenzen die Verweilzeit der Lösung in Bereichen hoher Temperaturen.

## CE 130 Konvektionstrocknung



### Beschreibung

- Konvektionstrockner für Trocknungsuntersuchungen körniger Feststoffe
- Aufnahme von Trocknungsverlaufskurven

Konvektionstrockner werden oft zur Trocknung von Feststoffen in der Lebensmitteltechnik eingesetzt. Mit CE 130 kann die Konvektionstrocknung körniger Feststoffe anschaulich dargestellt und untersucht werden.

Für die Trocknung des Feststoffes stehen vier herausnehmbare Bleche aus nichtrostendem Material zur Verfügung, die in einem Trocknungskanal eingesetzt werden können. Die Bleche mit dem zu trocknenden Feststoff sind in dem Kanal einem Luftstrom ausgesetzt. Der Luftstrom dient einerseits der Erwärmung des Feststoffes und andererseits dem Abtransport der abgegebenen Feuchtigkeitsmenge. Die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes kann über die Drehzahl eines Gebläses eingestellt werden. Ein einstellbarer Heizer ermöglicht die Erwärmung der Luft. Die transparente Tür im Trocknungskanal erlaubt die Beobachtung des Trocknungsprozesses.

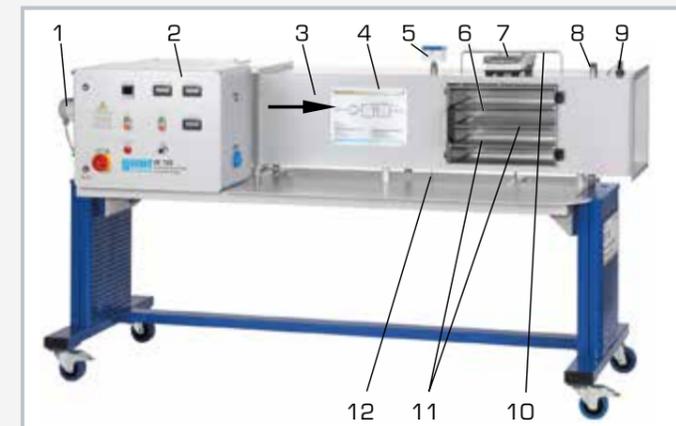
Mit einer digitalen Waage lässt sich die Gewichtsänderung des Feststoffes durch die Verdunstung bzw. Verdampfung der Feuchtigkeitsmenge auch während des Betriebs erfassen. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte können mit einem einzelnen kombinierten Feuchte- und Temperaturempfänger vor und nach dem Überströmen des Feststoffes erfasst und am Schaltschrank digital angezeigt werden. Ein weiterer Empfänger misst die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes.

Die relevanten Messwerte (Gewichtsänderung, Feuchte, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit) können auch direkt an einen PC übertragen und dort verarbeitet werden.

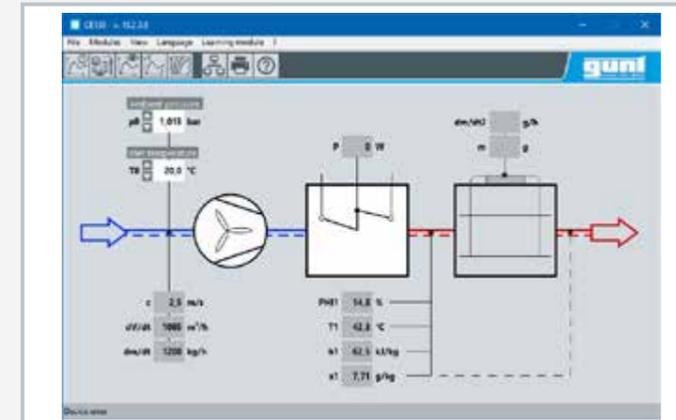
### Lerninhalte / Übungen

- Einfluss der Lufttemperatur und der Luftfeuchte auf die Trocknungsintensität
- Aufnahme von Trocknungsverlaufskurven bei konstanten äußeren Bedingungen
- Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Luftparametern und verschiedenen Feststoffeigenschaften
- Bewertung der Trocknungsprozesse über Energie- und Massenbilanzen

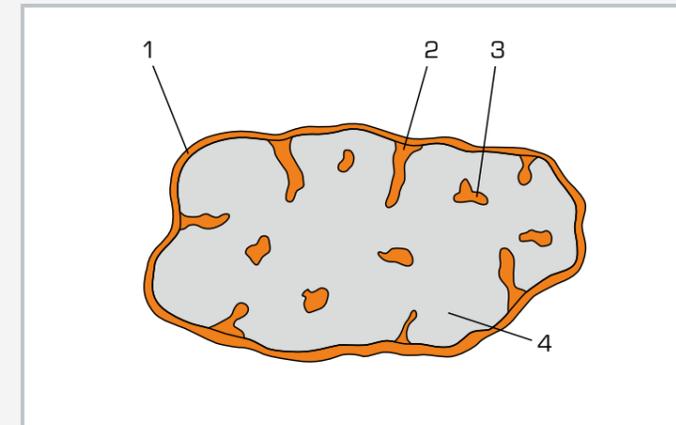
## CE 130 Konvektionstrocknung



1 Gebläse, 2 Schaltschrank mit Digitalanzeigen, 3 Trocknungskanal, 4 Prozessschema, 5 Messpunkt mit Feuchte- und Temperaturempfänger, 6 transparente Tür, 7 digitale Waage, 8 Messpunkt Feuchte und Temperatur, 9 Aufnehmer Strömungsgeschwindigkeit, 10 Halterung für Trocknungsbleche, 11 Trocknungsbleche, 12 Temperaturempfänger der Regelung



Screenshot der Software



feuchtes Trockengut: 1 Oberflächenfeuchtigkeit, 2 Kapillarfeuchtigkeit, 3 Porenfeuchtigkeit, 4 Kristallwasser

### Spezifikation

- [1] Trockner zur Untersuchung der Konvektionstrocknung von Feststoffen
- [2] Trocknung auf 4 Blechen aus nichtrostendem Material in einem luftdurchströmten Trocknungskanal
- [3] Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit über Drehzahl eines Gebläses
- [4] Lufterwärmung mit geregelterm Heizer
- [5] digitale Waage zur Erfassung der Gewichtsänderung im Trocknungsverlauf
- [6] 1 kombinierter Aufnehmer zur Erfassung von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur vor und nach dem Feststoff
- [7] 1 Aufnehmer zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit
- [8] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

### Technische Daten

#### Trocknungskanal

- Länge: 2340mm (mit Gebläse)
- Innenabmessungen: 350x350mm

#### Gebläse

- Leistung: 33W
- max. Förderleistung: 700m<sup>3</sup>/h
- max. Drehzahl: 950min<sup>-1</sup>

#### Heizer

- Leistung 0...6750W
- mit einstellbarem Temperaturbegrenzer

#### Waage

- Messbereich: 0...10000g
- Auflösung: 0,1g

#### Messbereiche

- Luftfeuchte: 0...100% r.F.
- Temperatur: 0...125°C
- Strömungsgeschwindigkeit: 0...2,5m/s

400V, 50Hz, 3 Phasen

400V, 60Hz, 3 Phasen

230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 2350x800x1200mm

Gewicht: ca. 175kg

### Für den Betrieb erforderlich

PC mit Windows empfohlen

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Waage
- 4 Trocknungsbleche
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 715 Steigfilmverdampfung



Die Abbildung zeigt ein ähnliches Gerät

### Beschreibung

- **Steigfilmverdampfer zur Aufkonzentrierung temperaturempfindlicher Lösungen**
- **hygienischer Betrieb durch ausgewählte Materialien wie Edelstahl und Glas**
- **Reinigung im montierten Zustand möglich**
- **Gegenstromverfahren**

Verdampfer werden in der Verfahrens- und Lebensmitteltechnik zur Aufkonzentrierung von Lösungen verwendet. Dabei wird ein Teil des Lösungsmittels durch Verdampfung abgetrennt, so dass die Lösung mit einer höheren Konzentration an gelösten Feststoffen zurückbleibt. Filmverdampfer werden insbesondere dann eingesetzt, wenn es sich um temperaturempfindliche Lösungen wie z.B. Milch handelt.

Mit CE 715 kann das Betriebsverhalten eines Steigfilmverdampfers untersucht werden. Aus dem Feedbehälter wird die unbehandelte Lösung von unten in den Verdampfer gefördert. Der Verdampfer ist ein mit Dampf beheizter Doppelrohrwärmeübertrager. Der mantelseitige Heizdampfdruck wird über einen PID-Regler eingestellt. Zur Trennung des verdampften Lösungsmittels und der aufkonzentrierten Lösung ist dem Verdampfer ein Zyklon nachgeschaltet. Der abgetrennte Lösungsmitteldampf wird in einem wassergekühlten Kondensator verflüssigt und in einem Behälter gesammelt. Die aufkonzentrierte Lösung kann ebenfalls in einem Behälter gesammelt oder zur weiteren Aufkonzentrierung wieder in den Verdampfer geleitet werden.

Die beiden Behälter, der Zyklon und der Kondensator sind zur besseren Beobachtung aus Glas gefertigt. Das System kann zur Absenkung der Siedetemperatur des Lösungsmittels auch unter Vakuum betrieben werden. Zur Bilanzierung und Kontrolle des Prozesses werden alle relevanten Drücke, Temperaturen und Durchflüsse erfasst.

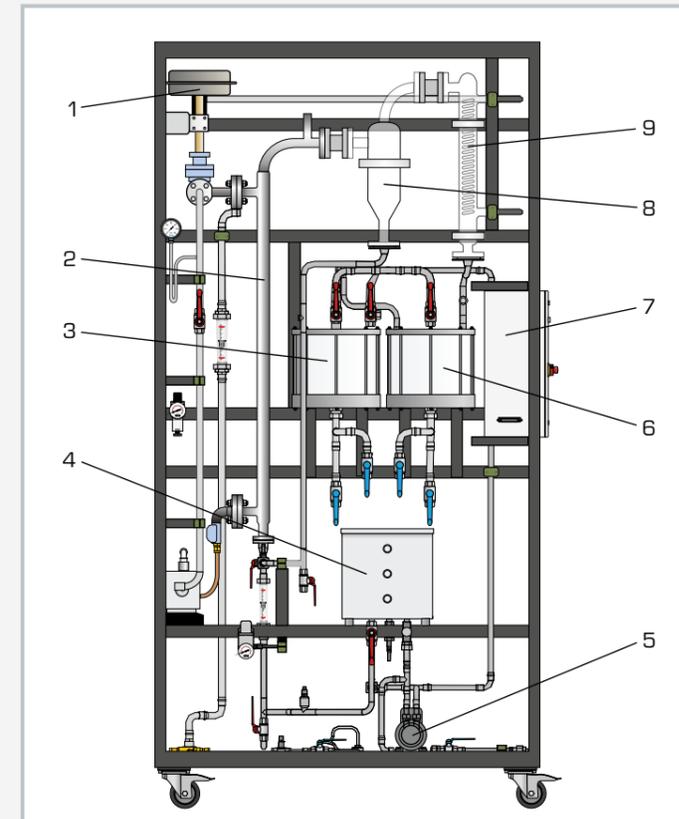
Für die Reinigung des Systems im montierten Zustand sind eine Pumpe und Reinigungsdüsen im Kondensat- und Konzentratbehälter vorgesehen.

Als Stoffe für die Versuche werden Kochsalz und Wasser empfohlen.

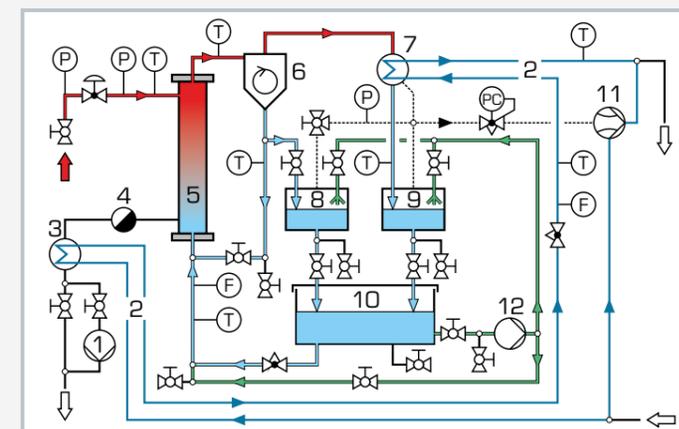
### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip der Filmverdampfung zur Aufkonzentrierung temperaturempfindlicher Lösungen
- Untersuchung der Einflussgrößen auf die Feststoffkonzentration der aufkonzentrierten Lösung
- Einfluss von Druck und Durchfluss des Feeds auf den Trennprozess
- Einfluss von Durchfluss und Druck des Heizdampfes auf den Trennprozess
- Untersuchung der Einflussgrößen auf die Energieeffizienz des Prozesses
- Energiebilanzen an Wärmeübertragern
- Anlagenreinigung im montierten Zustand

## CE 715 Steigfilmverdampfung



1 Regelventil Heizdampf, 2 Steigfilmverdampfer, 3 Konzentratbehälter, 4 Feedbehälter, 5 Reinigungspumpe, 6 Kondensatbehälter, 7 Schaltschrank, 8 Zyklon, 9 Kondensator



1 Pumpe Heizdampfkondensat, 2 Kühlwasser, 3 Kondensatkühler, 4 Kondensatableiter, 5 Steigfilmverdampfer, 6 Zyklon, 7 Kondensator, 8 Konzentratbehälter, 9 Kondensatbehälter, 10 Feedbehälter, 11 Wasserstrahlpumpe, 12 Reinigungspumpe; F Durchfluss, P Druck, T Temperatur

### Spezifikation

- [1] Steigfilmverdampfer zur Aufkonzentrierung temperaturempfindlicher Lösungen
- [2] dampfbeheizter Einrohrverdampfer aus Edelstahl
- [3] Regelventil zur Einstellung des Heizdampfdruckes über PID-Regler
- [4] Wasserstrahlpumpe und Vakuumregler zur Absenkung der Verdampfungstemperatur
- [5] Trennung der aufkonzentrierten Lösung und des verdampften Lösungsmittels durch Zyklon aus Glas
- [6] Kondensator aus Glas zur Verflüssigung des abgetrennten Lösungsmitteldampfes
- [7] Feedbehälter aus Edelstahl
- [8] Konzentratbehälter und Kondensatbehälter aus Glas
- [9] Erfassung von Durchfluss, Druck und Temperatur
- [10] Dampfversorgung über Labornetz oder CE 715.01

### Technische Daten

Steigfilmverdampfer

- Wärmeübertragungsfläche: ca. 0,08m<sup>2</sup>
- Länge: ca. 1,2m

Regelventil: K<sub>vs</sub>-Wert: 0,4m<sup>3</sup>/h

Wasserstrahlpumpe

- Endvakuum: ca. 100mbar
- Durchfluss: ca. 90L/min

Vakuumregler: -100...0kPa

Kondensator für Lösungsmitteldampf

- Wärmeübertragungsfläche: ca. 0,2m<sup>2</sup>

Behälter

- Feed: ca. 30L
- Konzentrat, Kondensat: je ca. 10L

Messbereiche

- Temperatur: 7x 0...170°C
- Druck: -1...1bar; 0...6bar (abs); 0...10bar
- Durchfluss: 2...36L/h; 0...1000L/h

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase

120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1420x750x2640mm

Gewicht: ca. 300kg

### Für den Betrieb erforderlich

Kühlwasser / Abwasser: min. 500L/h  
Druckluft (Regelventil): 3...4bar, max. 300L/h  
Dampf: min. 3bar, min. 5kg/h oder CE 715.01

### Lieferumfang

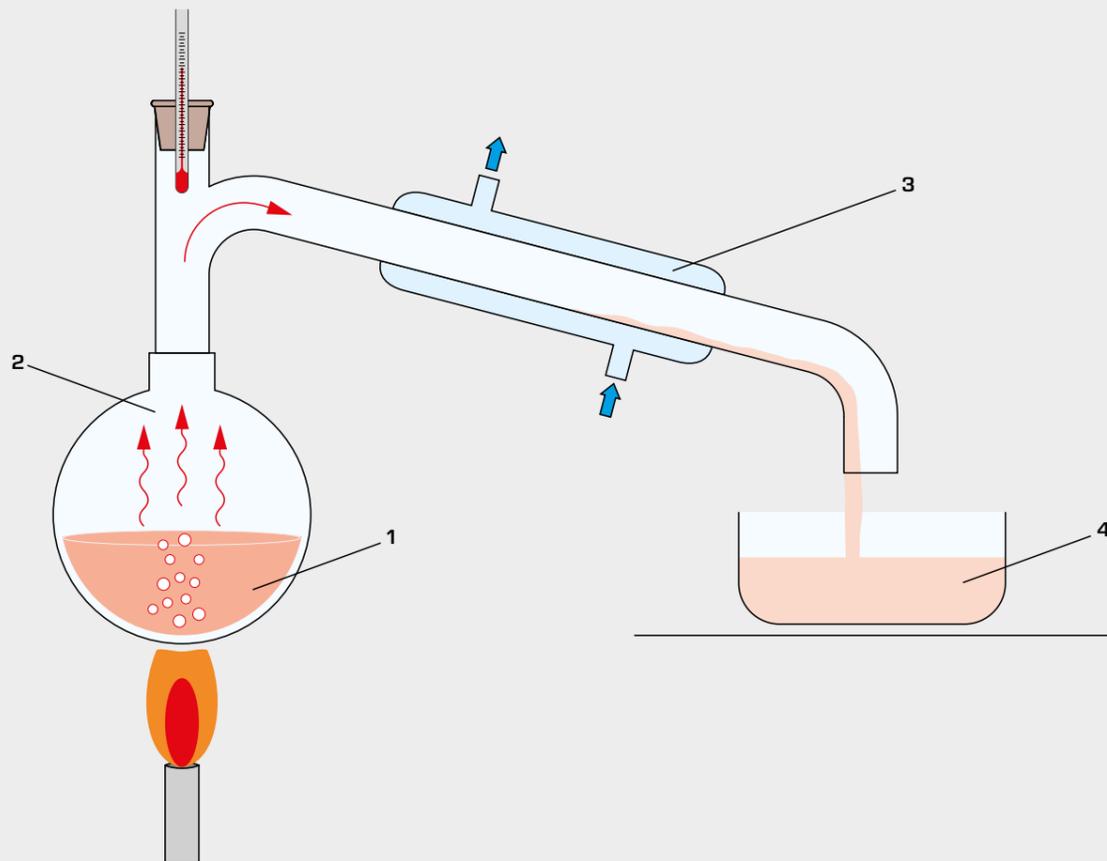
- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Destillation

Die Destillation ist ein Grundverfahren, mit dem homogene Flüssigkeitsgemische getrennt werden können. Dabei macht man sich die unterschiedlichen Flüchtigkeiten der zu trennenden Gemischkomponenten zunutze. Als Flüchtigkeit wird hierbei das

Bestreben eines Stoffes bezeichnet, aus der Flüssigphase in die Gasphase überzugehen. Beispiele für leichtflüchtige Flüssigkeiten sind Aceton, Alkohol und Benzin.



Prinzip der Destillation:

1 siedendes Flüssigkeitsgemisch, 2 aufsteigende Dampfphase, 3 Kondensator, 4 Destillat

Zur Trennung wird das Flüssigkeitsgemisch zum Sieden gebracht. Die entstehende Dampfphase besteht aus mehreren Komponenten. In ihr reichern sich überwiegend die leichter flüchtigen Gemischkomponenten an. Die Dampfphase wird von der Flüssigphase abgetrennt und kondensiert (Destillat). In der Flüssigphase verbleiben überwiegend die schwerer flüchtigen Komponenten.

Destillation führt nicht zur vollständigen Trennung des Flüssigkeitsgemisches, sondern zur Auftrennung in zwei Gemische mit jeweils unterschiedlichen Gehalten an leichter und schwerer flüchtigen Bestandteilen. Das Trennprinzip beruht auf der Tatsache, dass der Gehalt an leichter flüchtigen Bestandteilen in der Dampfphase größer ist als in der Flüssigphase.

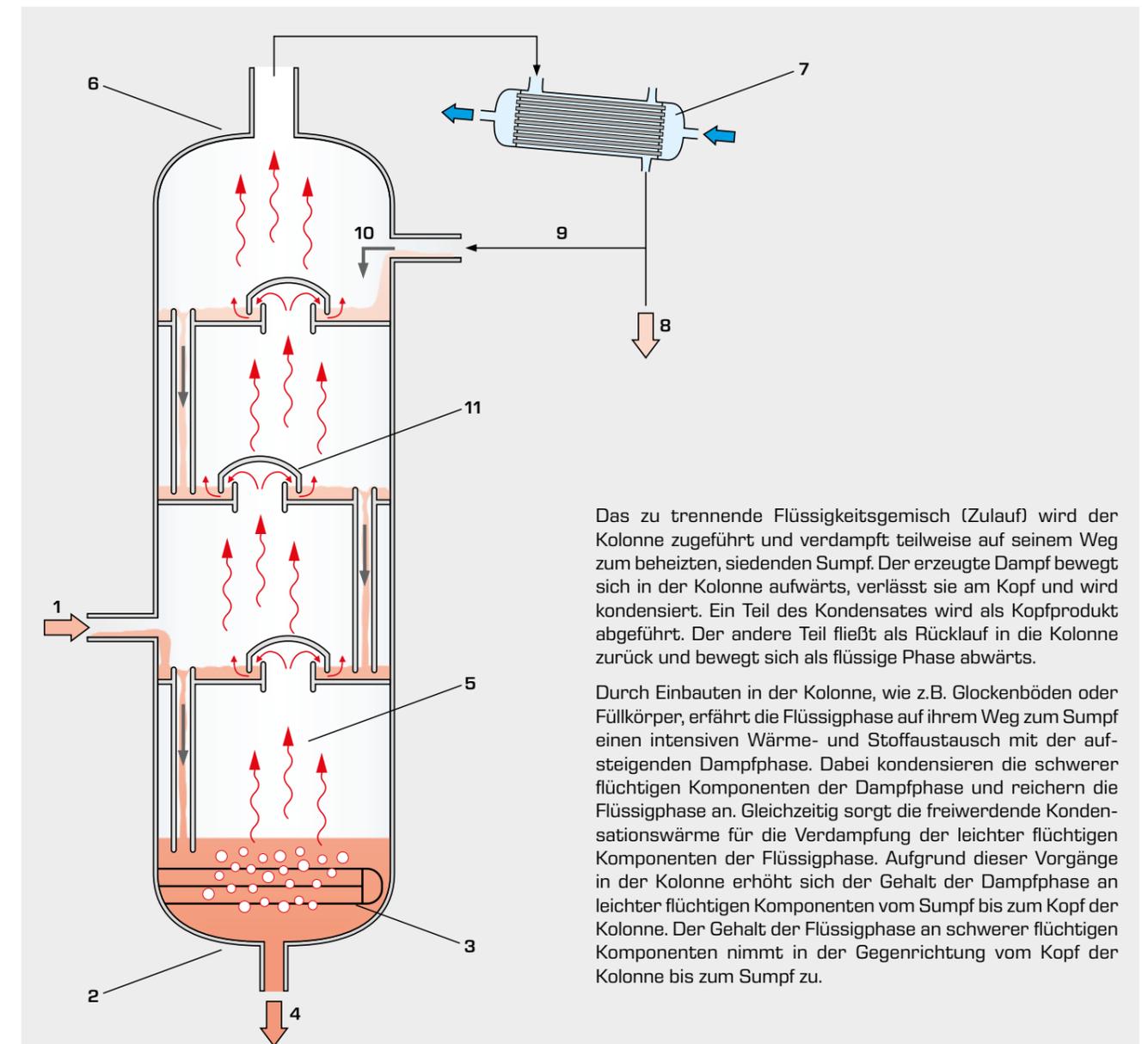
## Basiswissen

## Rektifikation

Die Rektifikation ist eine Anwendungsform der Destillation. Sie wird eingesetzt, wenn Stoffe in hoher Reinheit und /oder großen Mengen benötigt werden, z.B. zur Fraktionierung von Erdöl.

Wenn das bei einer Destillation gewonnene Destillat nochmals destilliert wird, erhält man ein neues Destillat mit einem noch höheren Gehalt an leichter flüchtigen Komponenten. Durch mehrfache Wiederholung dieses Vorganges kann dieser Gehalt im Destillat mit jedem Schritt erhöht werden.

In der Praxis wird diese mehrstufige Destillation in Form der Gegenstromdestillation (Rektifikation) in einer Kolonne durchgeführt.



Vereinfachte Darstellung einer Rektifikationskolonne:

1 Zulauf, 2 Sumpf der Kolonne, 3 Sumpfbeizung, 4 Sumpfprodukt, 5 aufsteigende Dampfphase, 6 Kopf der Kolonne, 7 Kondensator, 8 Kopfprodukt, 9 Rücklauf, 10 zurückfließende Flüssigphase, 11 Kolonnenboden (hier: Glockenboden)

Das zu trennende Flüssigkeitsgemisch (Zulauf) wird der Kolonne zugeführt und verdampft teilweise auf seinem Weg zum beheizten, siedenden Sumpf. Der erzeugte Dampf bewegt sich in der Kolonne aufwärts, verlässt sie am Kopf und wird kondensiert. Ein Teil des Kondensates wird als Kopfprodukt abgeführt. Der andere Teil fließt als Rücklauf in die Kolonne zurück und bewegt sich als flüssige Phase abwärts.

Durch Einbauten in der Kolonne, wie z.B. Glockenböden oder Füllkörper, erfährt die Flüssigphase auf ihrem Weg zum Sumpf einen intensiven Wärme- und Stoffaustausch mit der aufsteigenden Dampfphase. Dabei kondensieren die schwerer flüchtigen Komponenten der Dampfphase und reichern die Flüssigphase an. Gleichzeitig sorgt die freiwerdende Kondensationswärme für die Verdampfung der leichter flüchtigen Komponenten der Flüssigphase. Aufgrund dieser Vorgänge in der Kolonne erhöht sich der Gehalt der Dampfphase an leichter flüchtigen Komponenten vom Sumpf bis zum Kopf der Kolonne. Der Gehalt der Flüssigphase an schwerer flüchtigen Komponenten nimmt in der Gegenrichtung vom Kopf der Kolonne bis zum Sumpf zu.

## Übersicht

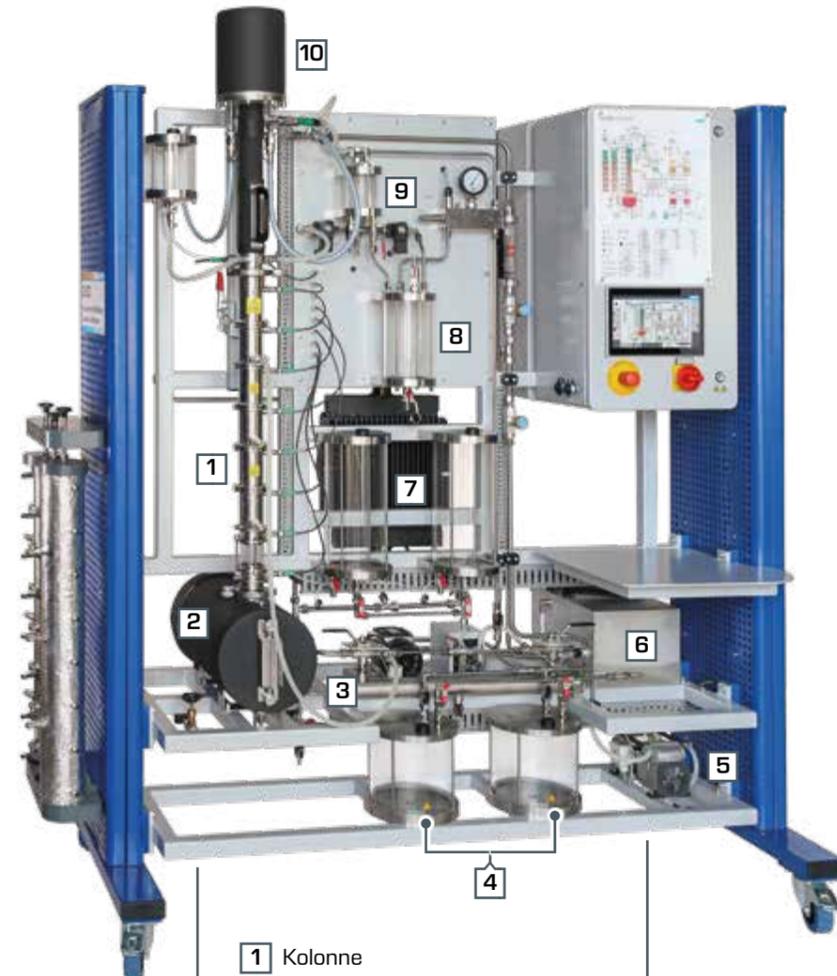
## CE 600 Kontinuierliche Rektifikation

Flüssigkeitsgemische, die aus ineinander löslichen Einzelflüssigkeiten bestehen, lassen sich durch thermische Verfahren, wie z.B. Destillation, trennen. Die Rektifikation entspricht einer energieoptimierten, mehrfach hintereinander durchgeführten Destillation.

CE 600 stellt eine kontinuierliche Rektifikation im Labormaßstab dar. Für die Experimente stehen drei verschiedene Kolonnentypen zur Verfügung:

- Glockenbodenkolonne
- Siebbodenkolonne
- Füllkörperkolonne

Die Glockenbodenkolonne und Siebbodenkolonne verfügen über jeweils acht Böden. Das zu trennende Flüssigkeitsgemisch kann den Kolonnen in drei unterschiedlichen Höhen zugeführt werden. Die Vorwärmung des Zulaufs ist mit Hilfe eines Wärmeübertragers möglich.

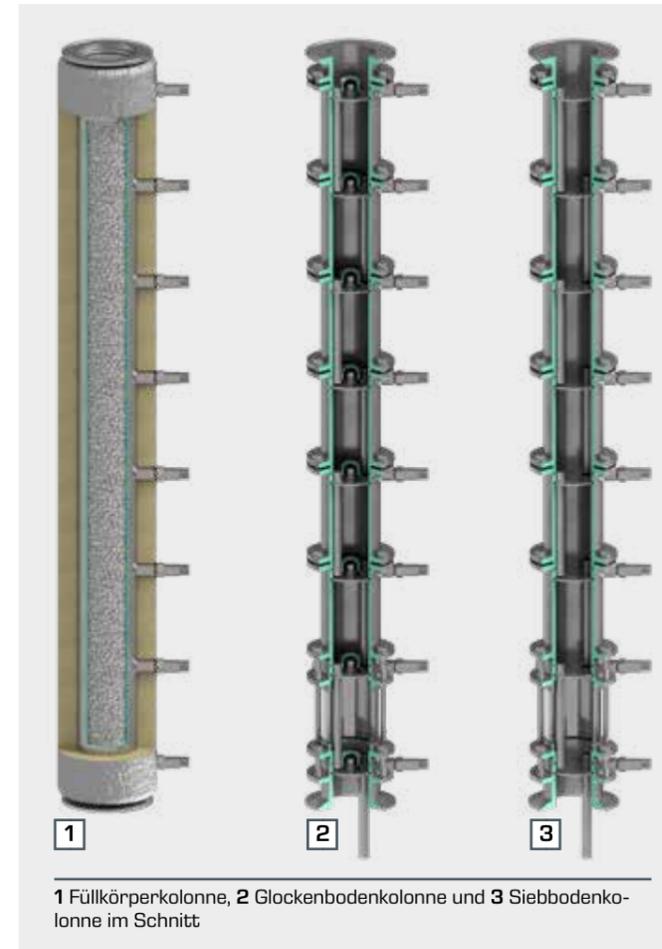


- 1 Kolonne
- 2 Sumpf mit Heizer
- 3 Wärmeübertrager
- 4 Sumpfproduktbehälter
- 5 Membranpumpe
- 6 Wasserbehälter für Kühlkreislauf
- 7 Zulaufbehälter
- 8 Kopfproduktbehälter
- 9 Phasentrennbehälter
- 10 Kopfkondensator

## Lerninhalte

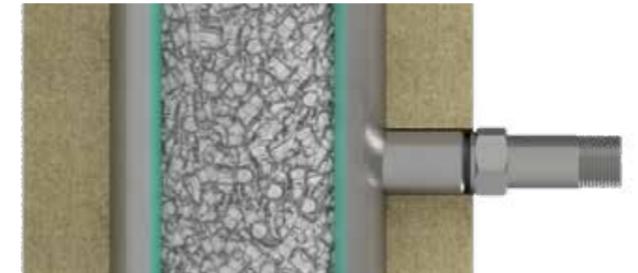
- Untersuchung und Vergleich einer Siebboden-, Glockenboden- und Füllkörperkolonne
  - ▶ im kontinuierlichen Betrieb
  - ▶ im diskontinuierlichen Betrieb
  - ▶ im Vakuumbetrieb
  - ▶ bei unterschiedlichen Höhen des Zulaufs
  - ▶ bei unterschiedlicher Bodenanzahl (Siebboden- und Glockenbodenkolonne)
- praxisnahe Temperaturregelung in der Kolonne
  - ▶ Rücklaufverhältnis als Stellglied für den Kolonnenkopf
  - ▶ Heizleistung als Stellglied für den Kolonnensumpf
- Bestimmung von Temperaturprofilen
- Druckverlust über der Kolonne
- Energieeffizienzsteigerung durch Zulaufvorwärmung

Zum Produkt:



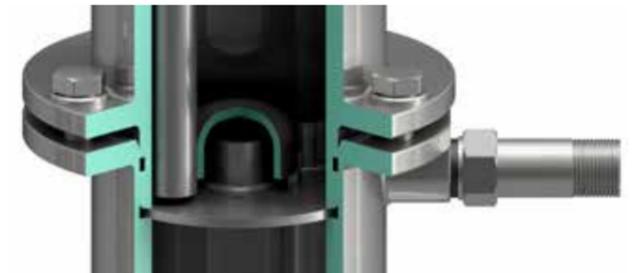
1 Füllkörperkolonne, 2 Glockenbodenkolonne und 3 Siebbodenkolonne im Schnitt

## Füllkörperkolonne



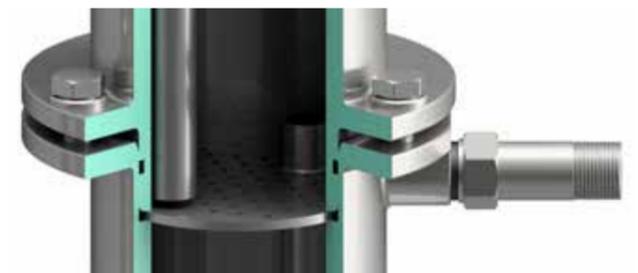
Eine Füllkörperkolonne besteht aus einer Schüttung mit Füllkörpern. Die Füllkörper haben eine sehr große Oberfläche, die für die Trennung verwendet wird. Die Flüssigphase fließt durch die Schüttung nach unten und die Gasphase strömt nach oben. Dabei findet zwischen den Phasen ein Stoffaustausch statt.

## Glockenbodenkolonne

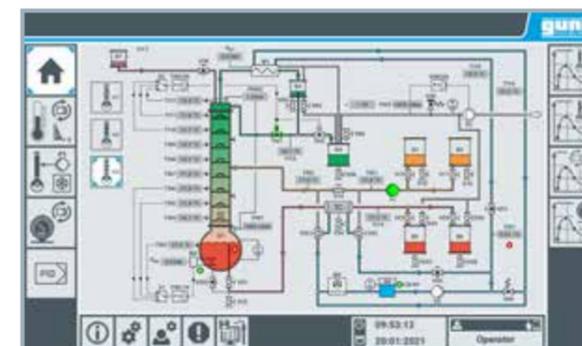


Jede Glocke besteht aus einem Kamin, in den die Gasphase von unten strömt. Die sich darüber befindende Glocke lenkt die Gasphase um und lässt sie in Bodennähe austreten. Im Betrieb steht die Glocke in der Flüssigphase, sodass die Gasphase beim Austritt durch die Flüssigphase aufsteigt. Dabei findet zwischen den Phasen ein Stoffaustausch statt.

## Siebbodenkolonne



Jeder Siebboden besteht aus 3 Abschnitten: dem Zulauf durch ein Rohr von dem darüber liegenden Boden, dem Sieb in der Mitte des Bodens und dem Ablauf zum darunter liegenden Boden. Im Betrieb strömt die Gasphase von unten durch das Sieb und steigt durch die Flüssigphase auf. Dabei findet zwischen den Phasen ein Stoffaustausch statt.



Bedienoberfläche des Touchscreen

## SPS und Software

Die Steuerung der Anlage erfolgt mit einer integrierten SPS mit Touchscreen. Die Messwerte werden am Touchscreen angezeigt und können gleichzeitig über LAN direkt auf einem PC oder mobilen Endgerät betrachtet werden. Mit Hilfe der GUNT-Software können die Messwerte ausgewertet werden.

## CE 600

### Kontinuierliche Rektifikation



Die Abbildung zeigt CE 600 mit der eingebauten Siebbodenkolonne, Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

#### Beschreibung

- Vergleich von Füllkörper-, Siebboden- und Glockenbodenkolonne
- Vakuumbetrieb mittels Membranpumpe möglich
- Anlagensteuerung mit integrierter SPS
- integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone

Die Rektifikation stellt ein wichtiges, thermisches Trennverfahren für homogene Flüssigkeitsgemische in der Industrie dar, wie z.B. zur Fraktionierung von Erdöl. Die Rektifikation entspricht einer energieoptimierten, mehrfach hintereinander durchgeführten Destillation.

CE 600 enthält 3 austauschbare Kolonnen: eine Siebboden-, eine Glockenboden- und eine Füllkörperkolonne. Das zu trennende Flüssigkeitsgemisch kann den Kolonnen in drei unterschiedlichen Höhen zugeführt werden. Die Vorwärmung des Zulaufs ist mit Hilfe eines Wärmeübertragers möglich. Für CE 600 wird Ethanol/Wasser als Flüssigkeitsgemisch empfohlen.

Das zugeführte Flüssigkeitsgemisch verdampft teilweise auf seinem Weg zum elektrisch beheizten, siedenden Sumpf.

Das erzeugte Dampfgemisch bewegt sich in der Kolonne aufwärts. Es ist mit der leichter siedenden Komponente (Ethanol) angereichert. Am Kopf verlässt es die Kolonne und wird mit einem Kondensator verflüssigt. Ein Teil dieses Kondensates wird in einem Behälter aufgefangen, der andere Teil wird als Rücklauf in die Kolonne zurückgeleitet. Dort erfährt er auf seinem Weg abwärts einen intensiven Wärme- und Stoffaustausch mit dem aufsteigenden Dampfgemisch. Dieser Austausch führt zur weiteren Anreicherung der Dampfphase mit Ethanol und der flüssigen Phase mit Wasser. Die flüssige Phase bewegt sich zum Sumpf und kann in zwei Behältern gesammelt werden.

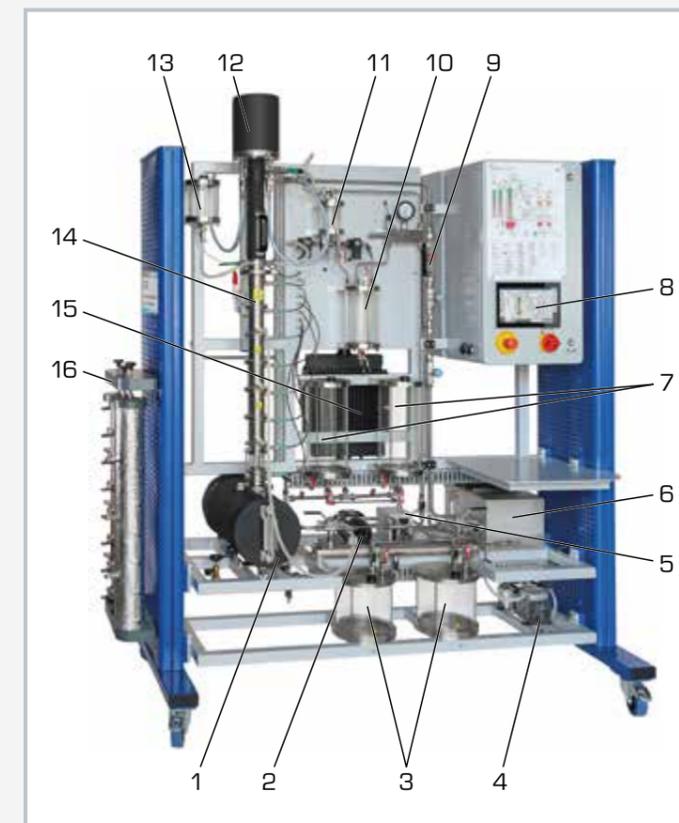
Der Versuchsstand wird über Touchscreen von einer SPS gesteuert. Mittels integrierten Router kann der Versuchsstand alternativ über ein Endgerät bedient und gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten via WLAN mit integriertem Router/LAN-Anbindung mit dem kundeneigenen Netzwerk möglich. Über direkte LAN-Anbindung können die Messwerte zusätzlich auf einen PC übertragen werden und dort mit Hilfe der GUNT-Software ausgewertet werden.

#### Lerninhalte / Übungen

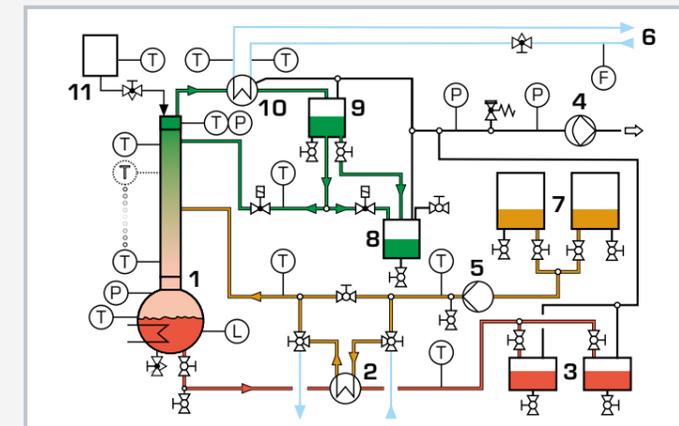
- Untersuchung und Vergleich einer Siebboden-, Glockenboden- und Füllkörperkolonne
  - ▶ im kontinuierlichen Betrieb
  - ▶ im diskontinuierlichen Betrieb
  - ▶ im Vakuumbetrieb
  - ▶ bei unterschiedlichen Höhen des Zulaufs
  - ▶ bei unterschiedlicher Bodenanzahl (Siebboden- und Glockenbodenkolonne)
- praxisnahe Temperaturregelung in der Kolonne
  - ▶ Rücklaufverhältnis als Stellglied für den Kolonnenkopf
  - ▶ Heizleistung als Stellglied für den Kolonnensumpf
- Bestimmung von Temperaturprofilen
- Druckverlust über der Kolonne
- Energieeffizienzsteigerung durch Zulaufvorwärmung
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

## CE 600

### Kontinuierliche Rektifikation



1 Verdampfer mit aufgesetzter Kolonne, 2 Wärmeübertrager Zulaufvorwärmung/Sumpfkühlung, 3 Sumpfproduktbehälter, 4 Membranpumpe, 5 Zulaufpumpe, 6 Vorratsbehälter für Kühlwasserkreislauf, 7 Behälter Zulauf, 8 Kopfproduktbehälter, 9 Phasentrennbehälter, 10 Kondensator Kopfprodukt, 11 Lösungsmittelbehälter, 12 Halterung Kolonnen



1 Verdampfer mit aufgesetzter Kolonne, 2 Wärmeübertrager Zulaufvorwärmung/Sumpfkühlung, 3 Sumpfproduktbehälter, 4 Membranpumpe, 5 Zulaufpumpe, 6 Kühlwasserkreislauf, 7 Behälter Zulauf, 8 Kopfproduktbehälter, 9 Phasentrennbehälter, 10 Kondensator Kopfprodukt, 11 Lösungsmittelbehälter; F Durchfluss, L Füllstand, P Druck, T Temperatur; orange: Zulauf, rot: Sumpfprodukt, grün: Kopfprodukt, blau: Kühlwasserkreislauf

#### Spezifikation

- [1] kontinuierliche und diskontinuierliche Rektifikation
- [2] Steuerung des Versuchsstandes mit einer SPS über Touchscreen
- [3] integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an bis zu 5 Endgeräten
- [4] Füllkörper-, Siebboden- und Glockenbodenkolonne, austauschbar
- [5] Siebboden- und Glockenbodenkolonne mit je 8 Böden
- [6] Füllkörperkolonne mit Raschgringen
- [7] 3 Zulaufe und 8 Temperaturenfnehmer je Kolonne
- [8] elektrisch beheizter Verdampfer
- [9] Kondensator und Phasentrennbehälter für Kopfprodukt
- [10] Steuerung des Rücklaufverhältnisses über Ventile
- [11] Wärmeübertrager zur Zulaufvorwärmung durch Sumpfprodukt oder Sumpfproduktkühlung durch Kühlwasser
- [12] wassersparend durch geschlossenen Kühlwasserkreislauf mit Wasser/Luft-Kühler
- [13] Vakuumbetrieb mit Membranpumpe möglich
- [14] Aräometer für Bestimmung der Zusammensetzung von Zulauf/Produkten im Lieferumfang enthalten
- [15] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk
- [16] GUNT-Software zur Datenerfassung über LAN unter Windows 8.1, 10

#### Technische Daten

SPS: Eaton XV303 mit I/O-System XN300  
 Kolonnen: Höhe x Ø innen: 780x50mm  
 Zulaufpumpe: max. Fördermenge: 320mL/min  
 Kühlwasserpumpe: max. Fördermenge: 10L/min  
 Membranpumpe: Endvakuum ca. 213mbar abs.  
 Behälter

- Zulauf: 2x ca. 5L
- Sumpfprodukt: 2x ca. 5L
- Kopfprodukt: ca. 1,9L

Wärmeübertragungsflächen

- Zulaufvorwärmung/Sumpfkühlung: ca. 0,03m<sup>2</sup>
- Kondensator Kopfprodukt: ca. 0,04m<sup>2</sup>

#### Messbereiche

- Temperatur: 33x 0...150°C
- Druckaufnehmer: 2x 0...2,5bar (Kolonne), 1x -1...1bar
- Manometer: -1...0,6bar
- Rücklaufverhältnis: 0...100%
- Leistung: 0...4kW (Heizer)
- Durchfluss: 30...320L/h (Kühlwasser)
- Dichte: 0,7...1g/mL

400V, 50Hz, 3 Phasen; 400V, 60Hz, 3 Phasen  
 230V, 60Hz, 3 Phasen; UL/CSA optional  
 LxBxH: 1905x790x2200mm  
 Gewicht: ca. 400kg

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand, 1 Satz Zubehör, 1 GUNT-Software
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 602

### Diskontinuierliche Rektifikation



#### Lerninhalte / Übungen

- Untersuchung und Vergleich einer Siebboden- und einer Füllkörperkolonne
  - ▶ im diskontinuierlichen Betrieb
  - ▶ im Vakuumbetrieb
  - ▶ bei unterschiedlichen Rücklaufverhältnissen
  - ▶ bei unterschiedlicher Bodenanzahl
- Bestimmung von Konzentrationsprofilen
- Bestimmung von Temperaturprofilen
- Druckverlust über der Kolonne

#### Beschreibung

- **diskontinuierliche Rektifikation**
- **Vergleich von Füllkörper- und Siebbodenkolonne**
- **Vakuumbetrieb möglich**
- **Böden der Siebbodenkolonne herausnehmbar**

Destillation dient der Trennung von Flüssigkeitsgemischen, die aus ineinander löslichen Einzelflüssigkeiten bestehen. Als Rektifikation wird die Destillation im Gegenstrom bezeichnet. Für CE 602 wird als Flüssigkeitsgemisch Ethanol/Wasser empfohlen. Es wird in den Behälter des Verdampfers (Sumpf) eingefüllt. Das erzeugte Dampfgemisch bewegt sich in der Kolonne aufwärts. Es ist mit der leichter siedenden Komponente (Ethanol) angereichert. Am Kopf verlässt es die Kolonne und wird mit einem Kondensator und einem Phasentrennbehälter verflüssigt.

Ein Teil dieses Kondensates wird als Produkt in einem Behälter aufgefangen, der andere Teil wird als Rücklauf in die Kolonne zurückgeleitet. Dort erfährt er auf seinem Weg abwärts einen intensiven Wärme- und Stoffaustausch mit dem aufsteigenden Dampfgemisch. Dieser Austausch führt zur weiteren Anreicherung der Dampfphase mit Ethanol und der flüssigen Phase mit Wasser. Die flüssige Phase bewegt sich zum Sumpf und sammelt sich dort an.

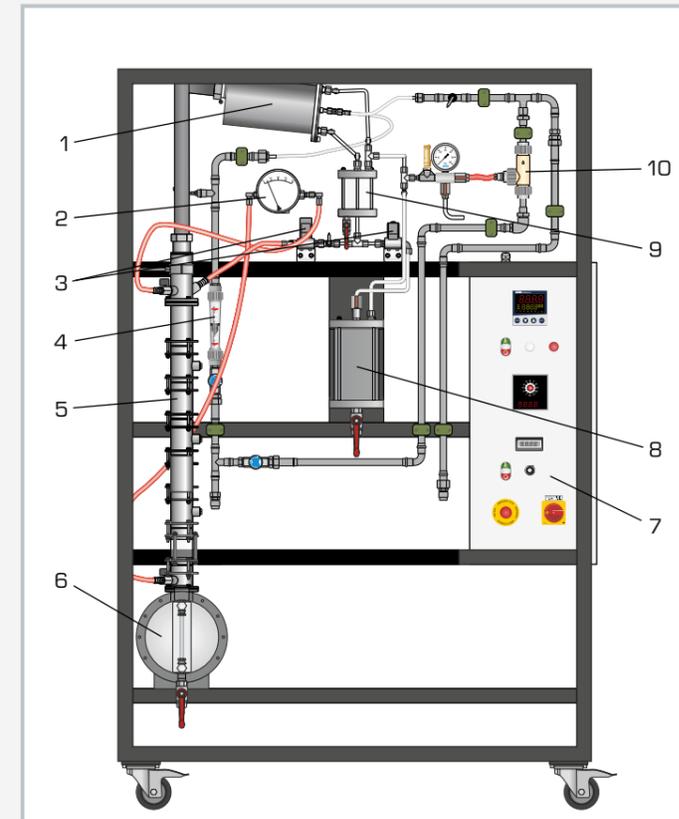
Es stehen eine Siebbodenkolonne und eine Füllkörperkolonne zur Verfügung. Die Füllkörperkolonne ist mit Raschigringen gefüllt. Das Rücklaufverhältnis kann über ansteuerbare Ventile eingestellt werden.

Relevante Messwerte werden mit Aufnehmern erfasst und am Schaltschrank digital angezeigt. Die Einstellung des Verdampfers erfolgt über einen PID-Regler.

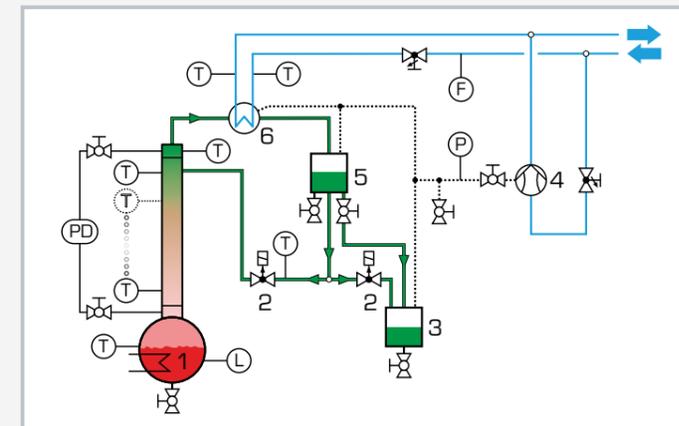
Ein großflächiges, deutliches Prozessschema auf dem Schaltschrank ermöglicht die einfache Zuordnung aller Prozessgrößen.

## CE 602

### Diskontinuierliche Rektifikation



1 Kondensator Kopfprodukt, 2 Manometer (Differenzdruck Kolonne), 3 Ventile (Rücklaufverhältnis), 4 Durchflussmesser Kühlwasser, 5 Siebboden- oder Füllkörperkolonne, 6 Verdampfer, 7 Schaltschrank mit Anzeige- und Bedienelementen, 8 Kopfproduktbehälter, 9 Phasentrennbehälter, 10 Wasserstrahlpumpe



1 Verdampfer mit Kolonne, 2 Ventile (Rücklaufverhältnis), 3 Kopfproduktbehälter, 4 Wasserstrahlpumpe, 5 Phasentrennbehälter, 6 Kondensator; F Durchfluss, L Füllstand, P Druck, PD Differenzdruck, T Temperatur; blaue Linien: Kühlwasser

#### Spezifikation

- [1] diskontinuierliche Rektifikation mit Füllkörper- und Siebbodenkolonne
- [2] Kolonnen auswechselbar
- [3] Siebbodenkolonne mit 8 Böden
- [4] Füllkörperkolonne mit Raschigringen
- [5] Vakuumbetrieb mit Wasserstrahlpumpe möglich
- [6] elektrisch beheizter Verdampfer
- [7] Behälter für Kopfprodukt
- [8] Kondensator und Phasentrennbehälter für Kopfprodukt
- [9] alle Behälter aus DURAN-Glas und Edelstahl
- [10] Einstellung des Rücklaufverhältnisses über Ventile
- [11] 8 Temperaturempfänger je Kolonne

#### Technische Daten

Kolonnen: Innendurchmesser: 50mm, Höhe: 765mm  
Wasserstrahlpumpe: Endvakuum: ca. 200mbar  
Behälter  
 ■ Kopfprodukt: ca. 2000mL  
 ■ Phasentrennung: ca. 500mL

Verdampfer  
 ■ Leistung: 0...4kW  
 ■ Behälter: ca. 10L

Wärmeübertragungsfläche  
 ■ Kondensator Kopfprodukt: ca. 0,04m<sup>2</sup>

#### Messbereiche

- Temperatur: 13x 0...150°C
- Rücklaufverhältnis: 0...100%
- Durchfluss: 30...320L/h (Kühlwasser)
- Differenzdruck: 0...60mbar (Kolonne)
- Manometer: -1...0,6bar

400V, 50Hz, 3 Phasen  
230V, 60Hz, 3 Phasen, 400V, 60Hz, 3 Phasen  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1300x750x2100mm  
Gewicht: ca. 210kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss: 500...1000L/h, Abfluss

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Kolonne
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 610

### Vergleich von Rektifikationskolonnen



#### Lerninhalte / Übungen

- Untersuchung und Vergleich einer Siebboden- und einer Füllkörperkolonne
  - ▶ im kontinuierlichen Betrieb
  - ▶ mit verschiedenen Drücken
  - ▶ mit verschiedenen Rücklaufverhältnissen
  - ▶ mit verschiedenen Zulaufhöhen
- Bestimmung der Ethanolanteile im Zulauf und in den Produkten
- Bestimmung des Verstärkungsverhältnisses der Siebböden
- Auswertung mit dem McCabe-Thiele-Diagramm
- Auswertung mit dem NTU-HTU-Konzept

#### Beschreibung

- kontinuierliche Rektifikation
- Füllkörper- und Siebbodenkolonne
- Prozesswärmezufuhr durch Dampf
- Anlagensteuerung mit SPS über Touchpanel
- über 40 Messgrößen und 12 Regelkreise

Die Rektifikationskolonnen werden für die Trennung von Flüssigphasen eingesetzt und funktionieren nach dem Prinzip der Destillation. Das Trennverfahren Destillation beinhaltet die teilweise Verdampfung einer Flüssigphase und die Kondensation der entstandenen Gasphase. Das Trennverfahren der Rektifikation ist eine energieoptimierte Mehrstufendestillation. Das empfohlene Stoffgemisch für den Betrieb der Versuchsanlage ist Wasser-Ethanol.

Die Versuchsanlage CE 610 ist für den kontinuierlichen Betrieb einer Rektifikationskolonne zur Zeit ausgelegt. Als Rektifikationskolonne steht eine Füllkörperkolonne mit Pallringen und eine Siebbodenkolonne mit zehn Böden zur Verfügung.

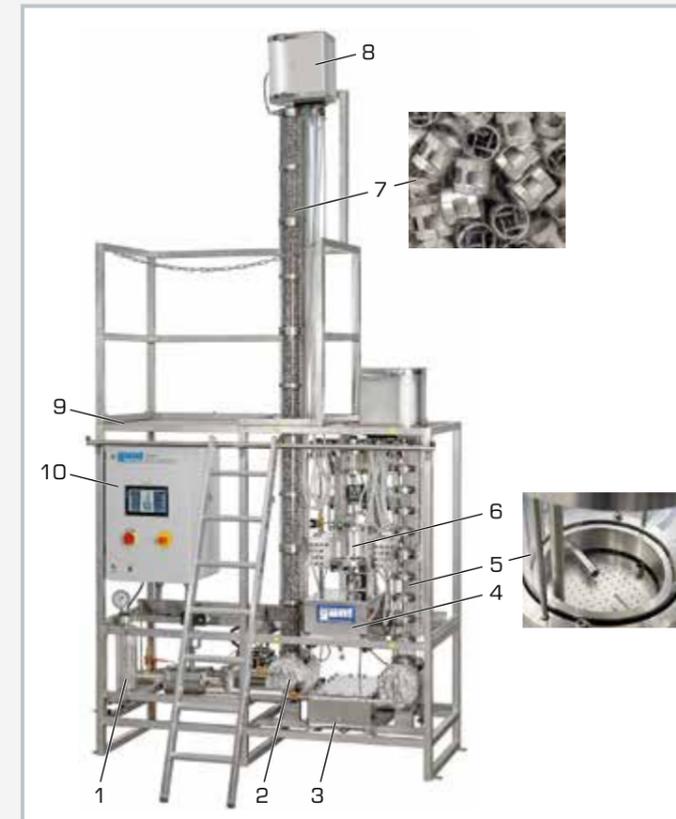
Für die Untersuchung der Rektifikationskolonnen können diverse Prozessparameter variiert werden. Hierzu zählen beispielsweise das Rücklaufverhältnis und die Temperaturmessstelle für die Temperaturregelung. Die Auswirkung der Änderungen werden mit den Ethanolanteilen in den Produkten ermittelt (gravimetrische Messung) und so die Trennleistung bestimmt. Für die Auswertung der Versuche steht innerhalb der Software die Bestimmung der theoretischen Trennstufen mit dem McCabe-Thiele-Diagramm und dem NTU-HTU-Konzept zur Verfügung.

Die Versuchsanlage hat umfangreiche Mess-, Regel- und Bedienfunktionen, die von einer SPS gesteuert werden. Ein Touchpanel zeigt Messwerte und Betriebszustände an und ermöglicht die Anlagenbedienung. Die Messwerte können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der Software ausgewertet werden.

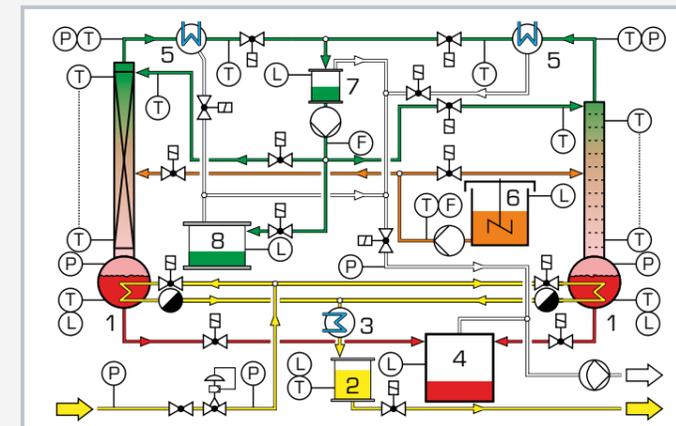
Die Dampfversorgung erfolgt über das Labornetz oder über den optional erhältlichen elektrischen Dampferzeuger [CE 715.01].

## CE 610

### Vergleich von Rektifikationskolonnen



1 Kondensatbehälter, 2 Kolonnensumpf mit Verdampfer, 3 Sumpfproduktbehälter, 4 Zulaufbehälter, 5 Siebbodenkolonne mit Kopfcondensator und Kolonnensumpf, 6 Kopfproduktbehälter, 7 Füllkörperkolonne, 8 Kopfcondensator, 9 Plattform, 10 Schaltschrank mit SPS und Touchpanel



1 Verdampfer mit Kolonne, 2 Kondensatbehälter, 3 Kondensatkühler, 4 Sumpfproduktbehälter, 5 Kopfcondensator, 6 Zulaufbehälter, 7 Phasentrennbehälter, 8 Kopfproduktbehälter; F Durchfluss, L Füllstand, P Druck, T Temperatur; rot: Sumpfprodukt, grün: Kopfprodukt, orange: Zulauf, blau: Kühlwasser, gelb: Dampf, weiß: Vakuum

#### Spezifikation

- [1] kontinuierliche Rektifikation mit Füllkörper- oder Siebbodenkolonne
- [2] variables Rücklaufverhältnis
- [3] Füllkörperkolonne mit Pallringen mit 10 Zulaufhöhen und Temperaturmessungen
- [4] Siebbodenkolonne mit 10 Böden; jeder Boden mit Zulauf und Temperaturmessung
- [5] Behälter für Zulauf, Sumpf- und Kopfprodukt aus DURAN-Glas und Edelstahl
- [6] Betrieb bei bis zu 115°C und 1,5bar
- [7] Erfassung aller relevanter Größen mit über 40 Aufnehmern
- [8] SPS mit Touchpanel für die Anlagensteuerung
- [9] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

#### Technische Daten

Füllkörperkolonne  
 ■ Innendurchmesser: 100mm  
 ■ Packungshöhe: 3000mm

Siebbodenkolonne  
 ■ Innendurchmesser: 100mm  
 ■ Anzahl der Siebböden: 10

Zulaufpumpe  
 ■ max. Durchfluss: 19L/h

Behälter  
 ■ Zulauf: 20L

Messbereiche  
 ■ Temperatur: 31x 0...150°C  
 ■ Durchfluss: 1x 1,5...20L/h (Zulauf)  
 ■ Durchfluss: 1x 0,3...105L/h (Destillat)  
 ■ Durchfluss: 1x 24...720L/h (Kühlwasser)  
 ■ Druck:  
 ▶ 5x 0...2,5bar (abs.)  
 ▶ 1x 0...5bar  
 ▶ 1x 0...10bar

230V, 50Hz, 1 Phase  
 230V, 60Hz, 1 Phase, 120V, 60Hz, 1 Phase  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 2030x850x4000mm  
 Gewicht: ca. 480kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Kühlwasser (min. 800L/h, min. 4bar, max. 25°C),  
 Dampf (8kg/h, 4...6bar)  
 PC mit Windows empfohlen

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsanlage
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Absorption

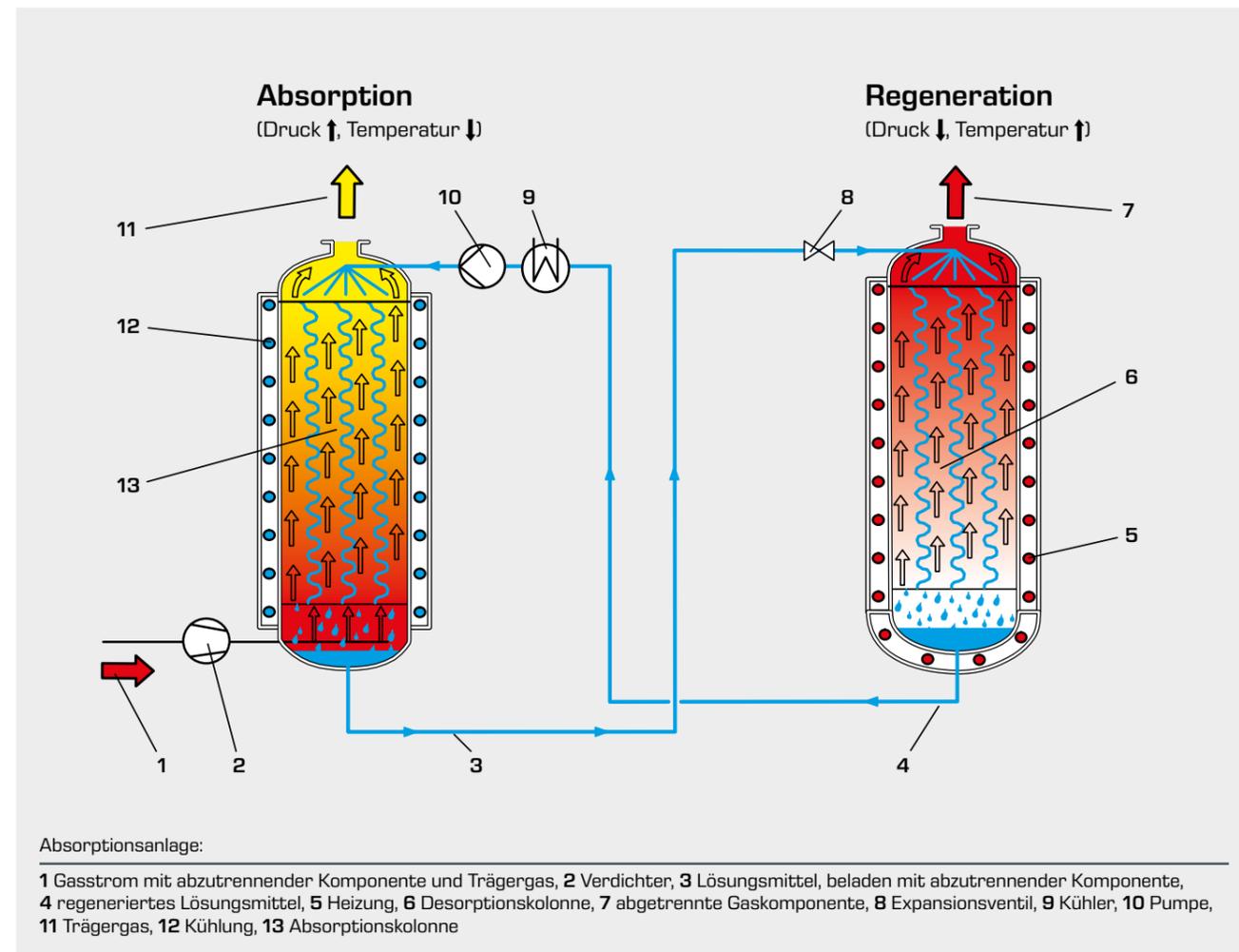
Die Absorption dient der Abtrennung einer oder mehrerer Gaskomponenten aus einem Gasstrom mit Hilfe eines Lösungsmittels. Die Ziele der Absorption können unterschiedlich sein:

- die abzutrennende Gaskomponente ist ein gewünschtes Produkt.

- die abzutrennende Gaskomponente ist unerwünscht. Es kann sich z.B. um die Entfernung eines Schadstoffes aus einem Abgasstrom handeln.

- Herstellung einer Flüssigkeit; ein Beispiel hierfür ist die Salzsäuregewinnung durch Absorption von HCl-Gas in Wasser.

An der Absorption nehmen mindestens drei Stoffe teil: Die abzutrennende Gaskomponente (Absorbend), das Trägergas und das Lösungsmittel (Absorbens).



Je nach abzutrennender Gaskomponente muss ein entsprechendes Lösungsmittel verwendet werden, das diese Komponente selektiv löst. Selektiv bedeutet in diesem Fall, dass das Lösungsmittel hauptsächlich die abzutrennende(n) Komponente(n) und nicht das Trägergas aufnimmt. Hohe Drücke und niedrige Temperaturen begünstigen die Absorption.

Je nach Art des Lösungsmittels wird das Gas durch physikalisches Lösen (physikalische Absorption) oder chemische Bindung (chemische Absorption) aufgenommen.

Zur Abtrennung der Gaskomponenten vom Lösungsmittel ist einer Absorptionsstufe meist eine Desorptionsstufe zur

Regeneration des Lösungsmittels nachgeschaltet. Dort wird durch hohe Temperaturen oder niedrige Drücke die Löslichkeit der Gase in dem Lösungsmittel verringert und diese werden so ausgetrieben. Das Lösungsmittel kann deshalb wiederverwendet und im Kreis geführt werden.

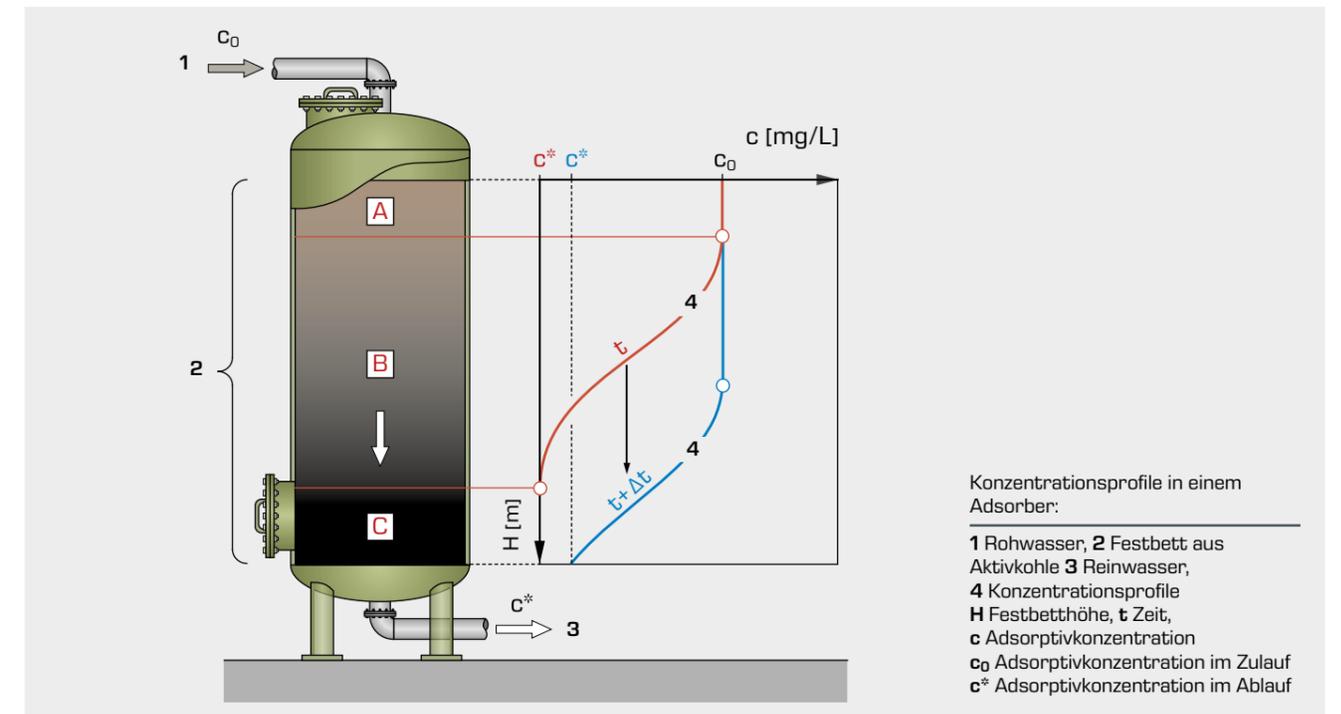
## Basiswissen

## Adsorption

Die Adsorption dient der Abtrennung einzelner Komponenten aus einem Gas- oder Flüssigkeitsgemisch. Dabei wird die abzutrennende Komponente an einer Feststoffoberfläche physikalisch oder chemisch gebunden.

Der Feststoff wird als Adsorbens, die daran adsorbierte Komponente als Adsorptiv bezeichnet. Wird Adsorbens ausreichend lange mit Adsorptiv in Kontakt gebracht, stellt sich ein Adsorp-

tionsgleichgewicht ein. Das Adsorbens ist dann vollständig beladen und kann kein Adsorptiv mehr aufnehmen. Das am weitesten verbreitete Adsorbens ist Aktivkohle. Aktivkohle verfügt über ein sehr ausgeprägtes Porensystem. So hat ein Gramm Aktivkohle eine Porenoberfläche von ca. 1000 m<sup>2</sup>.



Die Adsorption erfolgt überwiegend mit kontinuierlich durchströmten Adsorbent. Dabei stellt sich nach der Zeit  $t$  das in der Abbildung rot gezeichnete Konzentrationsprofil ein. Dieses entspricht dem Verlauf der Adsorptivkonzentration im Wasser entlang des Festbettes.

Dieses Konzentrationsprofil gliedert sich in drei Zonen:

- Zone A

Das Adsorbens ist vollständig beladen und kann kein Adsorptiv mehr aufnehmen. Das Adsorptionsgleichgewicht ist also erreicht. Die Adsorptivkonzentration entspricht der Zulaufkonzentration ( $c_0$ ).

- Zone B

Das Adsorptionsgleichgewicht ist noch nicht erreicht, so dass noch Adsorptiv adsorbiert wird. Diesen Bereich nennt man daher **Massenübergangzone**.

- Zone C

Da das Adsorptiv in Zone B vollständig entfernt wurde, ist das Adsorbens hier noch unbeladen. Die Adsorptivkonzentration ist also gleich Null.

Mit der Zeit wandert das Konzentrationsprofil in Fließrichtung durch das Festbett. Zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  entspricht es dem blauen Verlauf. Im gesamten Festbett gibt es kein unbeladenes Adsorbens mehr. Die Adsorptivkonzentration im Ablauf ( $c^*$ ) ist größer Null. Diesen Zustand bezeichnet man als Durchbruch, den zeitlichen Verlauf der Adsorptivkonzentration im Ablauf als Durchbruchkurve. Die Form des Konzentrationsprofils gibt Auskunft darüber, wie gut die Kapazität eines Adsorbens bis zum Durchbruch ausgenutzt wird. Die Kapazität wird umso besser ausgenutzt, je schmaler die Massenübergangzone ist.

## Übersicht CE 400 Gasabsorption

Absorptionsverfahren werden bei der Luftreinigung vielfach eingesetzt. Ein typisches Anwendungsgebiet ist die Abluftreinigung in Kraftwerken zur Entschwefelung von Gasen. Der Versuchstand CE 400 ermöglicht es Ihnen, die komplexen theoretischen Grundlagen dieses Verfahrens im Labormaßstab auf anschauliche Weise zu vermitteln.

Das Gerät ist für die absorptive Abtrennung von Kohlendioxid aus einem Luftstrom konzipiert. Als Lösungsmittel zur Aufnahme des Kohlendioxids wird Wasser verwendet. Dadurch ist für die Benutzer des Gerätes ein sicherer Betrieb gewährleistet.



- 1 Schaltschrank
- 2 Absorptionskolonnen
- 3 U-Rohr-Manometer
- 4 Desorptionskolonne
- 5 Kälteaggregat
- 6 Kühlbehälter
- 7 Prozessschema

### Funktionsweise

Hauptkomponenten des Gerätes sind zwei mit Raschigringen gefüllte Absorptionskolonnen. Von unten wird das zuvor gekühlte Luft/CO<sub>2</sub>-Gemisch in die Absorptionskolonnen gefördert. Im Gegenstrom rieselt das Lösungsmittel (Wasser) von oben nach unten durch die Absorptionskolonnen, wobei das Kohlendioxid im Wasser gelöst wird. Das so mit Kohlendioxid angereicherte Wasser kann in einer Desorptionskolonne anschließend regeneriert werden und steht dann für die Absorption wieder zur Verfügung.

### Messtechnik

Das Gerät ist mit umfangreicher Mess- und Regelungstechnik ausgestattet. Alle relevanten Durchflüsse, Temperaturen und Drücke werden kontinuierlich gemessen und angezeigt. Die Absorptionskolonnen sind überdies mit je einem U-Rohr-Manometer zur Messung der Differenzdrücke ausgestattet. Den Erfolg des Absorptionsprozesses können Sie mit Hilfe des mitgelieferten Gasanalysegerätes überprüfen. Somit benötigen Sie keine weitere messtechnische Ausrüstung, um quantifizierbare Ergebnisse zu erhalten.



Gasanalysegerät zur Bestimmung des Sauerstoffgehaltes und Kohlendioxidgehaltes.

Zum Produkt:



## UNIVERSITY OF Hull

CE 400 ist an vielen Hochschulen weltweit erfolgreich im Einsatz. So zum Beispiel an der University of Hull (England).



Ein Mitarbeiter von GUNT erläutert Dozenten von der University of Hull die Funktionsweise der Gasabsorption CE 400.

### Lerninhalte

- Untersuchung des Absorptionsvorganges bei der Trennung von Gasgemischen in einer Füllkörperkolonne
- Bestimmung der Druckverluste in der Kolonne
- Darstellung des Absorptionsvorganges im Beladungsdiagramm
- Untersuchung der Einflussgrößen auf die Absorptionseffektivität

**CE 400**  
Gasabsorption**Lerninhalte / Übungen**

- Untersuchung des Absorptionsvorganges bei der Trennung von Gasgemischen in einer Füllkörperkolonne
- Bestimmung der Druckverluste in der Kolonne
- Darstellung des Absorptionsvorganges im Beladungsdiagramm
- Untersuchung der Einflussgrößen auf die Absorptionseffektivität

2E

**Beschreibung**

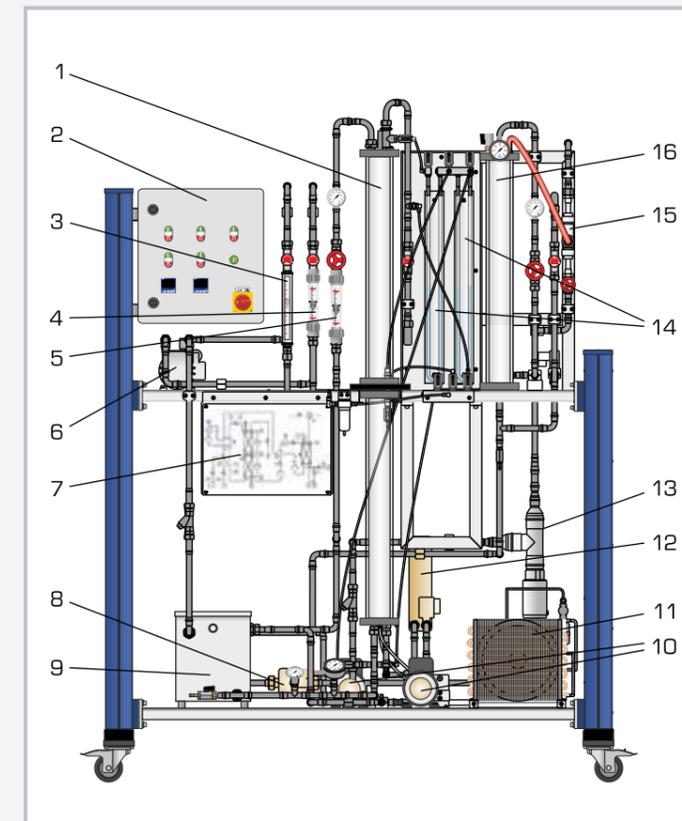
- **Trennung eines CO<sub>2</sub>-Luft-Gemisches durch Absorption im Gegenstrom**
- **Kolonne aus DURAN-Glas mit Füllkörpern**
- **sicherer Betrieb durch Verwendung von Wasser als Lösungsmittel und ungefährlicher Gase**
- **Regeneration des Lösungsmittels durch Vakuum**
- **Gasanalyse mit Handmessgerät**

Die Absorption dient der Abtrennung einer oder mehrerer Gaskomponenten aus einem Gasstrom mit Hilfe eines Lösungsmittels.

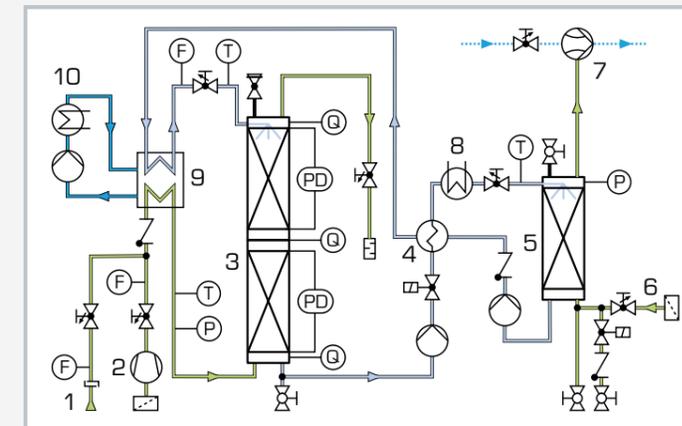
Es wird zunächst ein Gasgemisch aus CO<sub>2</sub> und Luft hergestellt. Dabei ist es möglich, das Mischungsverhältnis über Ventile einzustellen. Die Durchflüsse der Gaskomponenten werden angezeigt.

Ein Verdichter fördert das Gasgemisch in den unteren Teil der Absorptionskolonne. In der Kolonne findet im Gegenstrom mit dem Lösungsmittel die Abtrennung eines Teils des CO<sub>2</sub> statt. Als Lösungsmittel wird Wasser verwendet. Das CO<sub>2</sub> wird von dem herabrieselnden Wasser absorbiert. Um das im Wasser absorbierte CO<sub>2</sub> abzutrennen, wird das beladene Wasser aus dem unteren Teil der Absorptionskolonne in eine Desorptionskolonne geleitet. Die Löslichkeit des CO<sub>2</sub> im Wasser nimmt mit sinkendem Druck und steigender Temperatur ab. Ein Heizer erwärmt das Wasser. Eine Wasserstrahlpumpe erzeugt einen Unterdruck in der Desorptionskolonne. Dieser Umstand führt zum Ausgasen des CO<sub>2</sub> aus dem Wasser. Eine Pumpe fördert das so regenerierte Lösungsmittel zurück in die Absorptionskolonne.

Die Temperatur des Wassers kann geregelt werden. Durchfluss, Temperatur und Druck werden kontinuierlich erfasst. Die zweiteilige Absorptionskolonne ist mit Anschlüssen zur Bestimmung von Druckverlusten ausgestattet. Der Druckverlust im jeweiligen Teil kann an zwei U-Rohr-Manometern abgelesen werden. Um den Erfolg der Trennung zu bewerten, ist der Versuchsstand mit Entnahmestellen für Gas- und Flüssigkeitsproben ausgestattet. Die Gasproben können mit einem mitgelieferten Handmessgerät analysiert werden.

**CE 400**  
Gasabsorption

1 Absorptionskolonne, 2 Schaltschrank, 3 Durchflussmesser CO<sub>2</sub>, 4 Durchflussmesser Luft, 5 Durchflussmesser Lösungsmittel, 6 Verdichter, 7 Prozessschema, 8 Pumpe (Kühlung), 9 Kühlbehälter, 10 Pumpen (Absorption/Desorption), 11 Kälteaggregat, 12 Wärmeübertrager, 13 Heizer, U-Rohr-Manometer für Kolonne, 15 Wasserstrahlpumpe (Vakuum), 16 Desorptionskolonne



1 externe CO<sub>2</sub>-Druckgasflasche mit Druckminderventil, 2 Verdichter (Luft), 3 Absorptionskolonne, 4 Wärmeübertrager, 5 Desorptionskolonne, 6 Luft für Desorption, 7 Wasserstrahlpumpe (Vakuum), 8 Heizer, 9 Kühlbehälter, 10 Kälteaggregat; F Durchfluss, P Manometer, PD Differenzdruck, T Temperatur, G Probenahme (Gas)

**Spezifikation**

- [1] Trennung eines CO<sub>2</sub>-Luft-Gemisches durch Absorption im Gegenstrom mit Wasser
- [2] Herstellung des Gasgemisches mit CO<sub>2</sub> und Umgebungsluft
- [3] Einstellung des Mischungsverhältnisses mit Ventilen
- [4] 1 Verdichter zur Förderung des Gasgemisches in die Absorptionskolonne
- [5] Absorptionskolonne (mit Füllkörpern) und Desorptionskolonne aus DURAN-Glas
- [6] kontinuierliche Regeneration des Lösungsmittels im Kreislauf mit Desorptionskolonne unter Vakuum
- [7] 1 Pumpe für Desorptionskolonne und 1 Pumpe zur Rückführung des Lösungsmittels zur Absorptionskolonne
- [8] Regelung der Wassertemperatur mit Heizer und Kälteaggregat
- [9] Kältemittel R513A, GWP: 631

**Technische Daten**

Absorptionskolonne  
 ■ Höhe: 2x 750mm, Innendurchmesser: 80mm  
 Desorptionskolonne  
 ■ Höhe: 750mm, Innendurchmesser: 80mm  
 2 Pumpen (Absorption/Desorption)  
 ■ max. Förderstrom: 17,5L/min  
 ■ max. Förderhöhe: 47m  
 1 Pumpe (Kühlung)  
 ■ max. Förderstrom: 29L/min  
 ■ max. Förderhöhe: 1,4m  
 Verdichter  
 ■ max. Überdruck: 0,5bar  
 ■ max. Förderstrom: 34L/min  
 Kälteleistung: 1432W bei 5/32°C  
 Kältemittel: R513A, GWP: 631, Füllmenge: 600g,  
 CO<sub>2</sub>-Äquivalent: 0,4t

**Messbereiche**

- Durchfluss:
  - ▶ 0,2...2,4Nm<sup>3</sup>/h (Luft)
  - ▶ 50...600L/h (Lösungsmittel)
  - ▶ 0,4...5,4L/min (CO<sub>2</sub>)
- Temperatur: 2x -200...100°C, 3x 0...120°C, 4x 0...60°C
- Druck: 1x 0...2,5bar, 1x -1...0,6bar
- Differenzdruck: 2x 0...250mmWS
- CO<sub>2</sub>-Gehalt: 0...100Vol%

230V, 50Hz, 1 Phase  
 230V, 60Hz, 1 Phase; 230V, 60Hz, 3 Phasen  
 UL/CSA optional  
 LxBxH: 1920x790x2300mm  
 Gewicht: ca. 290kg

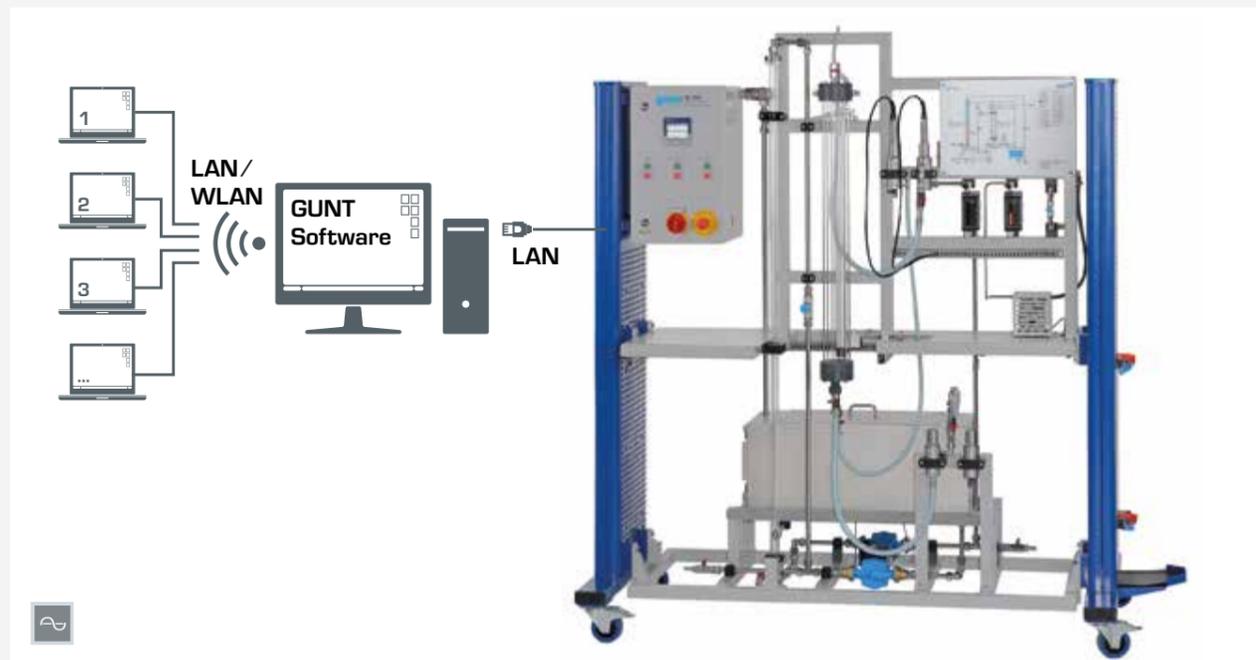
**Für den Betrieb erforderlich**

CO<sub>2</sub>-Gasflasche mit Druckminderventil  
 Wasseranschluss, Abfluss

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 Handmessgerät zur Gasanalyse
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 405 Fallfilmabsorption



Netzwerkfähige GUNT-Software: Steuerung und Bedienung über 1 PC. Versuche verfolgen, erfassen, auswerten an beliebig vielen Arbeitsplätzen über das kundeneigene LAN/WLAN-Netzwerk.

### Beschreibung

- **Abtrennung von Sauerstoff durch Absorption**
- **kontinuierliche Regeneration des Lösungsmittels mit Stickstoff durch Strippung**
- **sicherer Betrieb durch Verwendung von Wasser als Lösungsmittel und ungefährlicher Gase**
- **Netzwerkfähigkeit: Versuche verfolgen, erfassen, auswerten über kundeneigenes Netzwerk**

Die Absorption dient der Abtrennung einer oder mehrerer Gaskomponenten aus einem Gasstrom mit Hilfe eines Lösungsmittels. Die selektive Absorption ist ein wichtiges technisches Verfahren zur Reinigung von Gasgemischen. Mit CE 405 können die grundlegenden Vorgänge am System Wasser-Sauerstoff-Stickstoff untersucht werden.

Ein Verdichter fördert Umgebungsluft von unten in die Absorptionskolonne. Am Rand der Absorptionskolonne fließt Wasser als dünner Film herab. Die Luft strömt in der Kolonne zentral aufwärts. Ein Teil des Sauerstoffs der Luft wird in dem Wasserfilm gelöst. Der Luftstrom tritt oben aus der Kolonne aus. Das Wasser mit dem gelösten Sauerstoff verlässt die Kolonne unten und fließt in einen Behälter. Eine Pumpe fördert das Wasser mit dem gelösten Sauerstoff

zum Kopf der Desorptionskolonne.

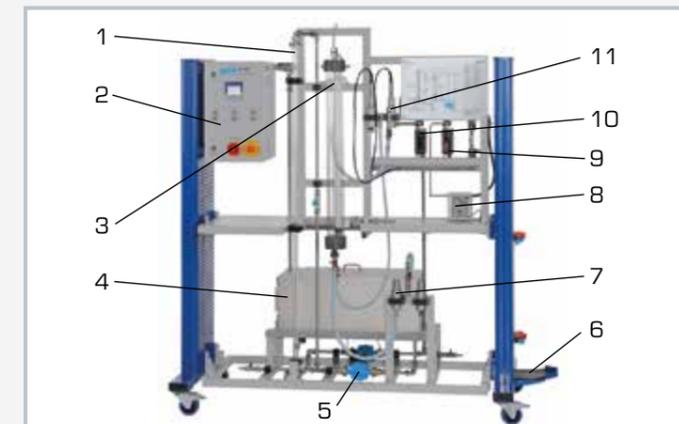
Die Desorptionskolonne ist ein einfaches Rohr, in dem das Wasser abwärts strömt. Aus einer Druckgasflasche tritt Stickstoff am Fuß der Kolonne ein. Der Stickstoff steigt in Form von dispers verteilten Blasen im Wasser nach oben. Der Partialdruck des Sauerstoffs im Wasser ist höher als der Partialdruck in der Gasphase (Stickstoff). Aus diesem Grund tritt ein Teil des Sauerstoffs aus dem Wasser in die Gasphase über (Strippung). Durch diesen Vorgang wird die Aufnahmefähigkeit des Wassers für Sauerstoff erhöht. Eine Pumpe fördert das so regenerierte Lösungsmittel zurück zum Kopf der Absorptionskolonne. Transparente Materialien erlauben die optimale Beobachtung der Vorgänge in beiden Kolonnen.

Ventile und Durchflussmesser erlauben die Einstellung des Luft- und Lösungsmittelstroms. Die Sauerstoffkonzentration und die Temperatur vor und nach der Absorptionskolonne werden kontinuierlich erfasst und digital angezeigt. Die Messwerte können gleichzeitig über eine direkte LAN-Anbindung auf einen PC übertragen werden und dort mit Hilfe der GUNT-Software ausgewertet werden.

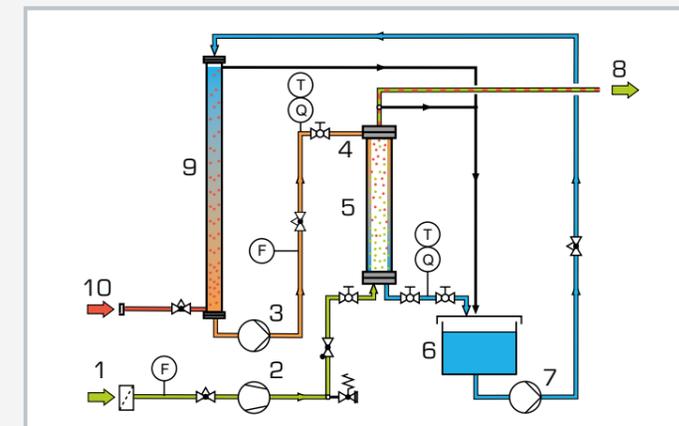
### Lerninhalte / Übungen

- Untersuchung des Absorptionsvorganges bei der Abtrennung von Sauerstoff aus einem Luftstrom in einer Fallfilmkolonne
- Bilanzierung des Prozesses
- Bestimmung des Stoffdurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von
  - ▶ Volumenstrom der Luft
  - ▶ Durchfluss des Lösungsmittels Wasser
- Regeneration des Lösungsmittels durch Strippung
- Gegenstromverfahren kennenlernen

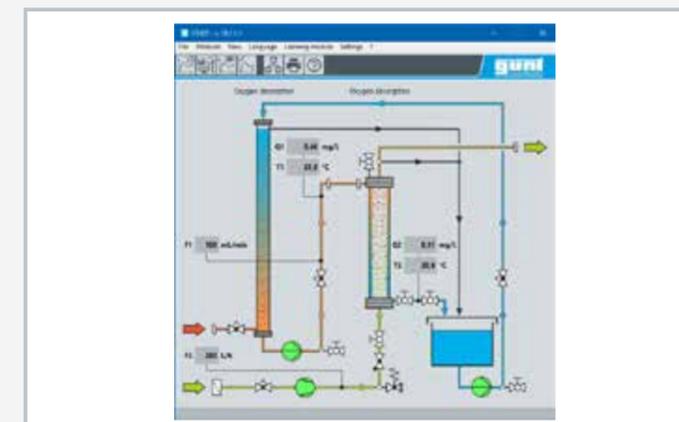
## CE 405 Fallfilmabsorption



1 Desorptionskolonne, 2 Schaltschrank, 3 Absorptionskolonne, 4 Behälter, 5 Pumpe, 6 Halter für Druckgasflasche, 7 Sauerstoff- und Temperaturenhemer nach Absorption, 8 Verdichter, 9 Durchflussmesser (Luft), 10 Durchflussmesser (Wasser), 11 Sauerstoff- und Temperaturenhemer vor Absorption



1 Eintritt Luft, 2 Verdichter, 3 Pumpe, 4 regeneriertes Lösungsmittel, 5 Absorptionskolonne, 6 Behälter (Lösungsmittel mit gelöstem Sauerstoff), 7 Pumpe, 8 Austritt Luft, 9 Desorptionskolonne, 10 Eintritt Stickstoff (extern); F Durchfluss, Q Sauerstoffkonzentration, T Temperatur



Screenshot der Software

### Spezifikation

- [1] transparente Fallfilmkolonne zur Absorption von Sauerstoff aus der Umgebungsluft in Wasser
- [2] kontinuierliche Regeneration des Wassers (Lösungsmittel) in einer transparenten Desorptionskolonne durch Strippung mit Stickstoff
- [3] Verdichter fördert Umgebungsluft in die Fallfilmkolonne
- [4] 2 Pumpen fördern Wasser zwischen den Kolonnen
- [5] Ventile und Durchflussmesser zur Einstellung des Luft- und des Lösungsmittelstroms
- [6] Aufnehmer für Sauerstoffkonzentration und Temperatur vor und nach der Absorptionskolonne
- [7] digitale Anzeige aller Messwerte
- [8] Netzwerkfähigkeit: Versuche verfolgen, erfassen und auswerten an beliebig vielen Arbeitsplätzen mit GUNT-Software über das kundeneigene LAN/WLAN-Netzwerk
- [9] Datenerfassung über kundeneigenes Netzwerk oder über direkte LAN-Anbindung mit GUNT-Software unter Windows 8.1, 10

### Technische Daten

- Absorptionskolonne
- Ø innen x Höhe: 32x890mm
  - Material: Glas
- Desorptionskolonne
- Ø innen x Höhe: 24x1650mm
  - Material: PMMA
- 2 Pumpen
- max. Fördermenge: je 58L/min
  - max. Förderhöhe: je 3,7m
- Verdichter
- max. Überdruck: 2bar
  - max. Fördermenge: 23L/min
- Behälter
- Volumen: ca. 50L
  - Material: Edelstahl

### Messbereiche

- Durchfluss: 38...380mL/min (Wasser)
- Durchfluss: 36...360NL/h (Luft)
- Temperatur: 2x 0...50°C
- Sauerstoffkonzentration: 2x 0...20mg/L

230V, 50Hz, 1 Phase; 230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase; UL/CSA optional  
LxBxH: 1930x790x1980mm  
Gewicht: ca. 135kg

### Für den Betrieb erforderlich

Stickstoff-Gasflasche mit Druckminderventil  
PC mit Windows empfohlen

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 GUNT-Software
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 540

### Adsorptive Lufttrocknung



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip der Adsorption und der Desorption
- Einflussgrößen auf den Adsorptions- und Desorptionsprozess untersuchen
  - ▶ Durchfluss der Luft
  - ▶ Feuchte und Temperatur der Luft
  - ▶ Schüttungshöhe des Adsorbens
- Darstellung der Prozesse im Mollierdiagramm
- Aufnahme von Durchbruchkurven und Bestimmung der Durchbruchzeit

#### Beschreibung

- **adsorptive Trocknung von feuchter Luft**
- **kontinuierlicher Prozess mit Regeneration des Adsorbens**
- **transparente Kolonnen und Adsorbens mit Indikator zur Beobachtung der Massenübergangszone**
- **GUNT-Software mit Steuerungsfunktionen und Datenerfassung**

Mit CE 540 können die komplexen theoretischen Grundlagen von Adsorptionsprozessen durch Versuche anschaulich vermittelt werden.

Ein Verdichter saugt Umgebungsluft an. Die Luft strömt durch das Wasserbad eines Befeuchters und besitzt danach eine relative Luftfeuchte von 100%. Bevor die Luft von unten in die Adsorptionskolonne strömt, werden ihre relative Luftfeuchte und ihre Temperatur mit einem Erhitzer eingestellt.

Die feuchte Luft strömt durch das Adsorbens (Silikagel), das als Festbett in einer transparenten Kolonne vorliegt. Dabei wird die in der Luft enthaltene Feuchtigkeitsmenge adsorbiert. Das Adsorbens enthält einen Indikator. An der Färbung des Indikators ist die Lage der Massenübergangszone (MÜZ) erkennbar. Die so getrocknete Luft verlässt die Kolonne und strömt ins Freie.

Zur Regeneration des Adsorbens wird Umgebungsluft von einem zweiten Verdichter angesogen. Die Luft wird erhitzt und strömt von oben in die Kolonne. Auch dieser Desorptionsprozess kann durch die transparente Kolonne beobachtet werden. Der Versuchsstand ermöglicht die simultane Untersuchung des Adsorptionsprozesses und des Desorptionsprozesses.

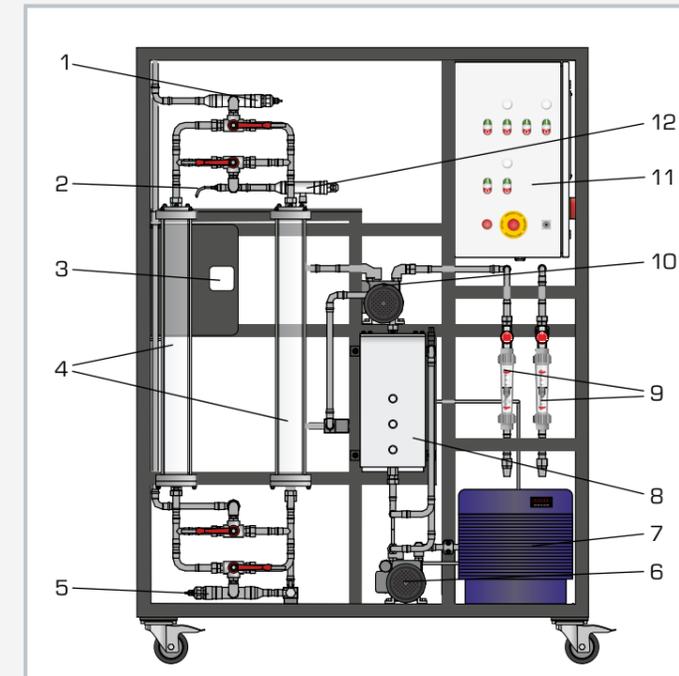
Ist die Kapazität des Adsorbens in der einen Kolonne erschöpft, wird die feuchte Luft zur Trocknung durch eine zweite Kolonne mit regeneriertem Adsorbens geleitet.

Ein Kreislauf mit Pumpe und Kälteaggregat steht zur Temperierung des Wasserbads im Befeuchter zur Verfügung. Die Temperatur und die Feuchte der zu trocknenden Luft werden über eine Software eingestellt. Die Durchflüsse der beiden Luftströme können an Ventilen eingestellt werden.

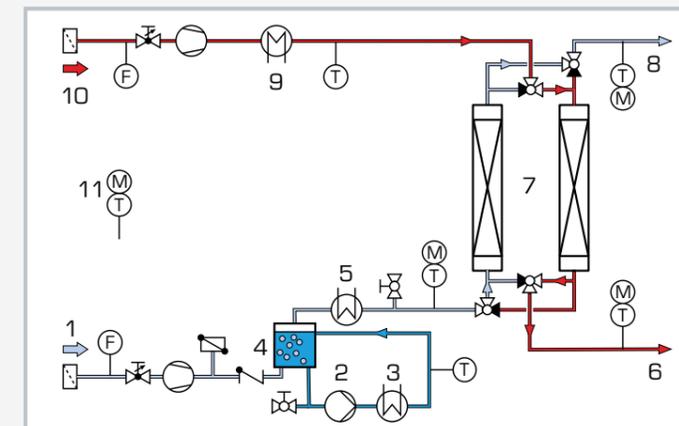
Durch die Erfassung der relativen Luftfeuchten und Temperaturen an allen relevanten Stellen lassen sich beide Prozesse vollständig bilanzieren. Die Messwerte werden mit einer Software aufgezeichnet. Sie ermöglicht die Darstellung des Adsorptions- und Desorptionsprozesses im Mollierdiagramm und die Aufnahme von Durchbruchkurven.

## CE 540

### Adsorptive Lufttrocknung



1 Feuchte-Temperatur-Aufnehmer getrocknete Luft, 2 Temperatureufnehmer Regenerationsluft, 3 Feuchte-Temperatur-Aufnehmer Umgebungsluft, 4 Adsorptionskolonnen, 5 Feuchte-Temperatur-Aufnehmer befeuchtete Zuluft, 6 Verdichter für Zuluft, 7 Kälteaggregat, 8 Befeuchter (Wasserbad), 9 Durchflussaufnehmer Regenerationsluft und Zuluft, 10 Verdichter Regenerationsluft, 11 Schaltschrank mit Bedienelementen, 12 Erhitzer Regenerationsluft



1 Zuluft (blau), 2 Pumpe für Befeuchter, 3 Kälteaggregat, 4 Befeuchter (Wasserbad), 5 Erhitzer, 6 beladene Regenerationsluft (rot), 7 Adsorptionskolonnen, 8 getrocknete Luft, 9 Erhitzer, 10 Luft für Regeneration, 11 Umgebungsluft, M Feuchte, T Temperatur, F Durchfluss

#### Spezifikation

- [1] kontinuierliche, adsorptive Lufttrocknung
- [2] 2 Kolonnen zur Beladung und Regeneration des Adsorbens im Wechsel
- [3] Beobachtung der Massenübergangszone durch transparente Kolonnen und Adsorbens mit Indikator
- [4] 2 Verdichter zur Förderung der Zuluft und der Regenerationsluft aus der Umgebung
- [5] Befeuchtung der Zuluft durch Durchströmung eines Wasserbads
- [6] Kreislauf mit Pumpe und Kälteaggregat zur Temperierung des Wasserbads
- [7] Einstellung der relativen Feuchte und der Temperatur der Zuluft mit Erhitzer
- [8] Erhitzer zur Temperierung der Regenerationsluft
- [9] Einstellung der Durchflüsse der Regenerationsluft und der Zuluft mit Ventilen
- [10] GUNT-Software mit Steuerungsfunktionen und Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

#### Technische Daten

- 2 Kolonnen
- Ø ca. 80mm
  - Höhe: ca. 800mm
- 2 Verdichter
- max. Überdruck: 1bar
  - max. Förderstrom: 8m<sup>3</sup>/h
- Pumpe für Befeuchter
- max. Förderstrom: 600L/h
  - max. Förderhöhe: 1,5m
- Kälteaggregat
- Kälteleistung: 395W bei Temperaturdiff. 10K / 250L
- 2 elektrische Lufterhitzer
- Leistung (Zuluft): 160W
  - Leistung (Regeneration): 2x 250W

#### Messbereiche

- Durchfluss: 2x 0...10Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatur: 3x 0...50°C, 1x 0...200°C, 1x -25...125°C (Luft)
- rel. Luftfeuchte: 4x 0...100%
- Temperatur: 1x 0...50°C (Wasser)

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 230V, 60Hz, 3 Phasen  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1390x750x1890mm  
Gewicht: ca. 150kg

#### Für den Betrieb erforderlich

PC mit Windows

#### Lieferumfang

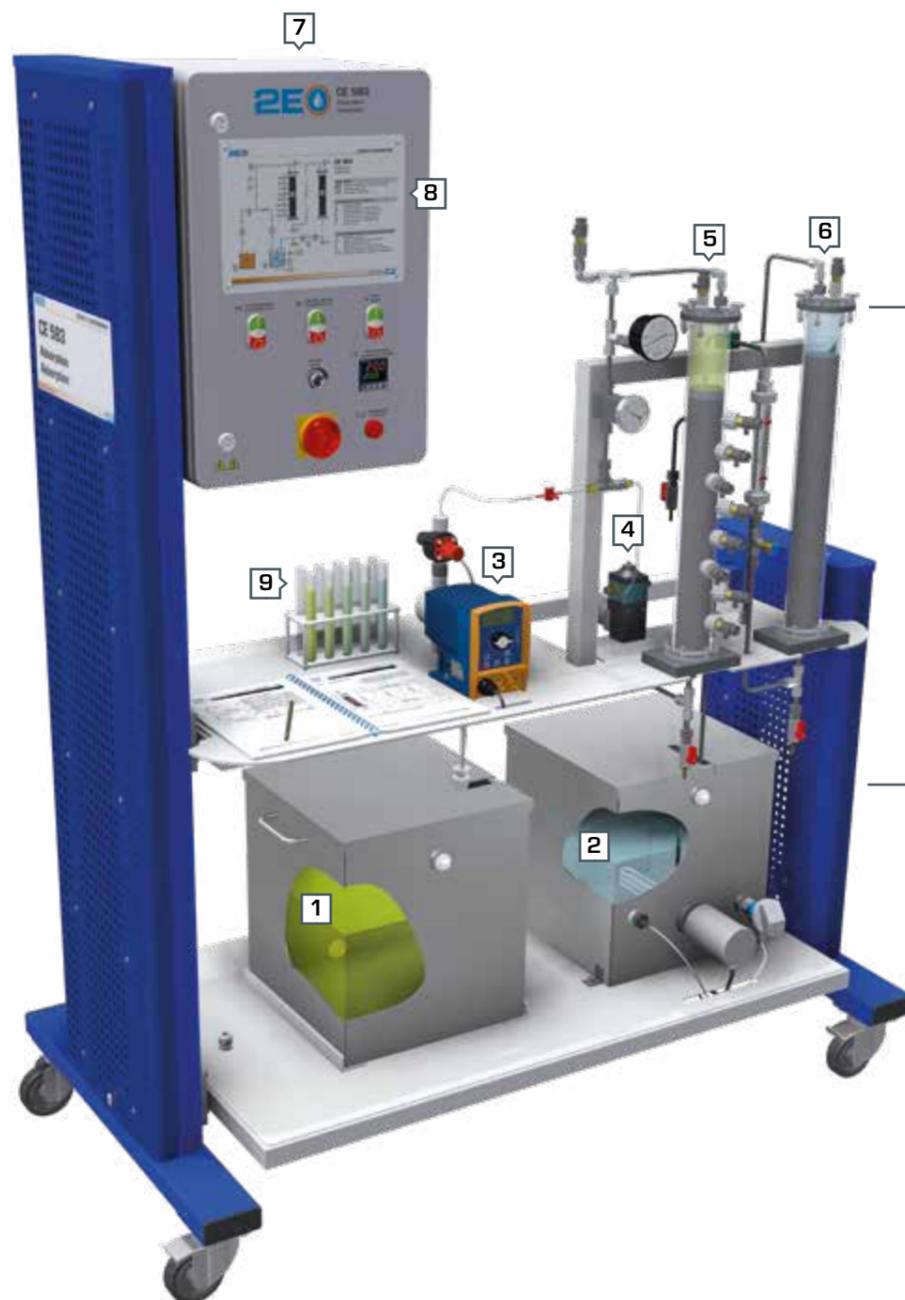
- 1 Versuchsstand
- 1 Gebinde Silikagel E
- 1 Satz Werkzeuge
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht CE 583 Adsorption

### Adsorptive Wasserbehandlung im kontinuierlichen Betrieb

Die Adsorption an Aktivkohle stellt eine effektive und oft praktizierte Alternative zur Entfernung biologisch nicht abbaubarer organischer Substanzen, wie z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe, dar. Mit unserem Gerät CE 583 können Sie die Grundlagen dieses Verfahrens im kontinuierlichen Betrieb und somit unter sehr praktischen Aspekten verdeutlichen.

Hauptkomponenten dieses Gerätes sind zwei in Reihe geschaltete Adsorber, die mit granulierter Aktivkohle gefüllt sind. Der erste Adsorber ist mit Probenahmehähnen ausgestattet, so dass Sie Konzentrationsprofile bestimmen können. Konzentrationsprofile sind für das Verständnis der Adsorption von zentraler Bedeutung.



- 1 Adsorptiv-Konzentrat
- 2 gereinigtes Wasser
- 3 Dosierpumpe
- 4 Zirkulationspumpe
- 5 erster Adsorber
- 6 zweiter Adsorber
- 7 Schaltschrank
- 8 Prozessschema
- 9 Reagenzgläser für Probenahmen

### i Adsorptiv

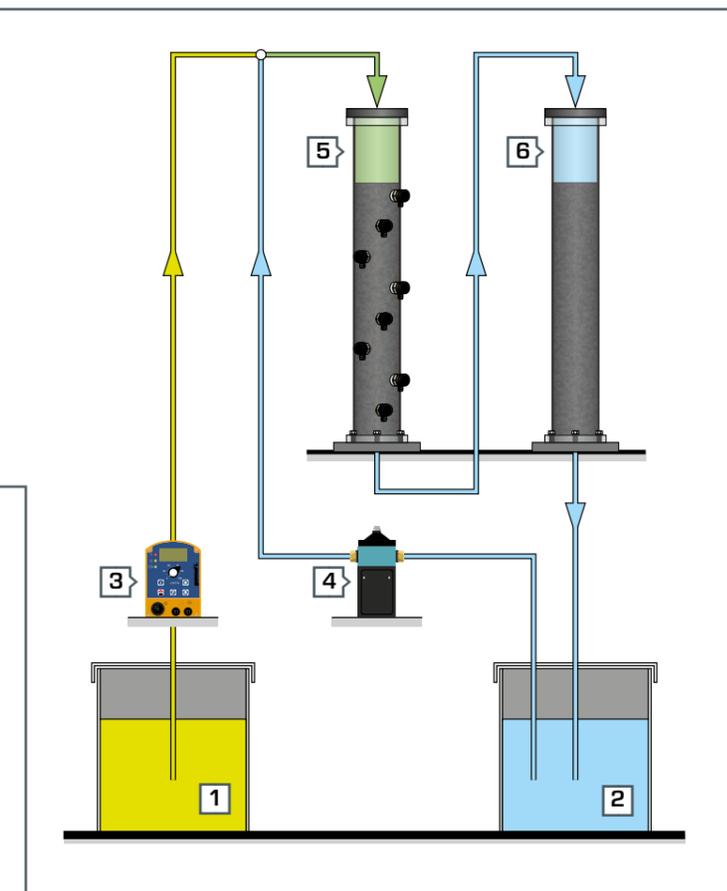
Als Adsorptiv bezeichnet man den im Wasser gelösten Stoff, der durch Adsorption eliminiert werden soll.

### Funktionsprinzip

Durch beide Adsorber wird gereinigtes Wasser zirkuliert. Eine Dosierpumpe injiziert konzentrierte Adsorptivlösung im Zulaufbereich des ersten Adsorbers in den Kreislauf. Die Dosierpumpe ermöglicht eine sehr genaue Einstellung der Fördermenge. Dadurch können Sie die gewünschte Zulaufkonzentration des Adsorptivs sehr genau einzustellen. Der zweite Adsorber stellt sicher, dass das zirkulierte Wasser selbst beim vollständigen Durchbruch des ersten Adsorbers kein Adsorptiv mehr enthält. Dies gewährleistet auch bei Langzeitversuchen eine konstante Adsorptivkonzentration im Zulauf des ersten Adsorbers.

### Temperaturregelung

Das Gerät ist mit einer Temperaturregelung ausgestattet. Dadurch können Sie den Einfluss der Wassertemperatur auf den Adsorptionsprozess untersuchen.

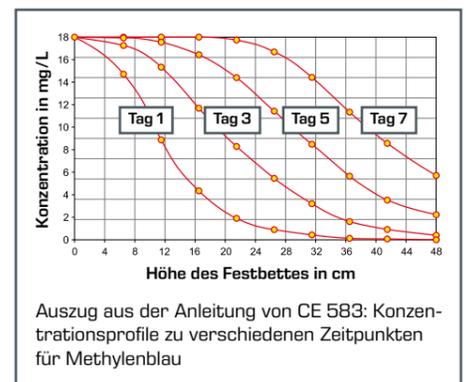


Zum Produkt:



### i Unsere Empfehlung

Besonders eindrucksvoll können Sie die Adsorption demonstrieren, wenn Sie als Adsorptiv einen wasserlöslichen und adsorbierbaren Farbstoff verwenden. Derartige Stoffe sind z.B. Methyleneblau oder Fluorescein.



### i Lerninhalte

- Aufnahme von Konzentrationsprofilen
- Aufnahme von Durchbruchkurven
- Zusammenhang zwischen Konzentrationsprofilen und Durchbruchkurven
- Bestimmung der Massenübergangzone
- Massenbilanz und Wirkungsgrad eines Adsorbers
- Vorhersage von Durchbruchkurven
- Übertragung der Ergebnisse auf industriellen Maßstab (Scale-up)
- Einflussfaktoren auf die Adsorption
  - ▶ Kontaktzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Betriebsweise

**CE 583**  
Adsorption**Lerninhalte / Übungen**

- Aufnahme von Konzentrationsprofilen
- Aufnahme von Durchbruchkurven
- Zusammenhang zwischen Konzentrationsprofilen und Durchbruchkurven
- Bestimmung der Massenübergangszone
- Massenbilanz eines Adsorbers
- Wirkungsgrad eines Adsorbers
- Vorhersage von Durchbruchkurven
- Übertragung der Ergebnisse auf industriellen Maßstab (Scale-up)
- folgende Einflussfaktoren erkennen
  - ▶ Kontaktzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Betriebsweise

**Beschreibung**

- **Adsorption gelöster Stoffe an Aktivkohle**
- **Konzentrationsprofile und Durchbruchkurven**
- **Bestimmung der Massenübergangszone**
- **Einfluss der Temperatur und der Kontaktzeit auf die Adsorption**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**

CE 583 demonstriert die Entfernung gelöster Stoffe durch Adsorption. Bei der Adsorption werden die im Rohwasser gelösten Stoffe als Adsorptiv bezeichnet.

Eine Pumpe fördert Wasser aus einem Behälter in einem Kreislauf mit zwei Adsorbern, die mit Aktivkohle gefüllt sind. Die Pumpe fördert Reinwasser zum ersten Adsorber. In den Reinwasserstrom wird mit einer Dosierpumpe eine konzentrierte Adsorptiv-Lösung zudosiert.

Das so erzeugte Rohwasser tritt in den Adsorber ein und strömt durch das Festbett aus Aktivkohle. Dabei adsorbiert das Adsorptiv an der Aktivkohle. Um eventuell noch vorhandene Mengen des Adsorptivs aus dem Wasser zu entfernen, durchströmt das Wasser anschließend einen zweiten Adsorber (Sicherheitsadsorber). Das Reinwasser wird wieder in die Zulaufleitung des ersten Adsorbers zurück geführt, wo erneut konzentrierte Adsorptiv-Lösung zudosiert wird. Auf diese Weise entsteht ein geschlossener Wasserkreislauf.

Die Förderströme beider Pumpen können eingestellt werden. Dadurch können folgende Parameter variiert werden:

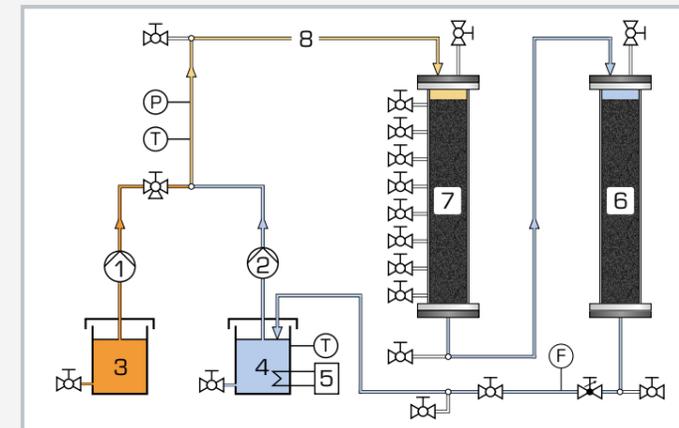
- Konzentration des Adsorptivs im Rohwasser
- Kontaktzeit des Rohwassers mit der Aktivkohle

Die Temperatur des Wassers kann geregelt werden. Auf diese Weise kann der Temperatureinfluss auf die Adsorption untersucht werden. Durchfluss, Temperatur und Druck werden kontinuierlich erfasst. Probenahmestellen sind so angeordnet, dass Durchbruchkurven und Konzentrationsprofile aufgenommen werden können.

Für die Auswertung der Versuche ist Analysetechnik erforderlich. Die Auswahl der Analysetechnik richtet sich nach dem verwendeten Adsorptiv. Als Adsorptiv kann z.B. Methylenblau verwendet werden. Die Konzentration von Methylenblau kann mit einem Fotometer bestimmt werden.

**CE 583**  
Adsorption

1 Behälter Adsorptiv-Lösung, 2 Zirkulationspumpe, 3 Reinwasserbehälter, 4 Heizer, 5 Temperaturempfänger, 6 Durchflussmesser, 7 Sicherheitsadsorber, 8 Adsorber, 9 Thermometer, 10 Manometer, 11 Schaltschrank, 12 Dosierpumpe



1 Dosierpumpe, 2 Zirkulationspumpe, 3 konzentrierte Adsorptiv-Lösung, 4 Reinwasser, 5 Heizer, 6 Sicherheitsadsorber, 7 Adsorber, 8 Rohwasser, F Durchfluss, P Druck, T Temperatur

**Spezifikation**

- [1] 2 Adsorber mit Aktivkohlefüllung
- [2] Adsorber mit 8 Probenahmestellen
- [3] Sicherheitsadsorber für geschlossenen Wasserkreislauf
- [4] kontinuierlicher Prozess
- [5] Dosierpumpe für konzentrierte Adsorptiv-Lösung
- [6] Pumpe für Zirkulation des Reinwassers
- [7] Regelung der Wassertemperatur
- [8] digitale Temperaturanzeige
- [9] Durchfluss einstellbar
- [10] Veränderung der Adsorptivkonzentration und der Kontaktzeit

**Technische Daten**

Adsorber und Sicherheitsadsorber

- Innendurchmesser: je 60mm
- Höhe: je 600mm
- Volumen: je 1700cm<sup>3</sup>

Behälter

- Reinwasser: 45L
- Adsorptiv-Lösung: 45L

Zirkulationspumpe

- max. Förderstrom: 180L/h
- max. Förderhöhe: 10m

Dosierpumpe

- max. Förderstrom: 2,1L/h
- max. Förderhöhe: 160m

Heizer

- max. Leistung: 500W

Messbereiche

- Durchfluss: 0...60L/h
- Temperatur: 0...60°C
- Druck: 0...2,5bar

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1500x790x1900mm  
Gewicht: ca. 180kg

**Für den Betrieb erforderlich**

Wasseranschluss, Abfluss  
Methylenblau (Empfehlung)

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 Gebinde Aktivkohle
- 1 Satz Reagenzgläser
- 1 Satz Werkzeuge
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Kristallisation

Die Kristallisation ist ein Grundverfahren der thermischen Verfahrenstechnik, das hauptsächlich der Trennung, der Reinigung, aber auch der Formgebung von Stoffen dient. Kennzeichnend für die Kristallisation ist die Bildung einer neuen festen Phase (Kristall). Das Kristallat kann aus einer Lösung, einer Schmelze oder aus Dampf entstehen. In der industriellen Verfahrens- und Chemietechnik steht die technische Massenkristallisation aus flüssigen Phasen, besonders aus Lösungen, im Vordergrund. Dabei spielt die Produktion von kristallinen Massengütern wie Zucker, Kochsalz und Düngemitteln aus wässrigen Lösungen eine bedeutende Rolle.

Ein Lösungsmittel (z.B. Wasser) ist bei einer festen Temperatur in der Lage, eine bestimmte Menge eines Stoffes (Salz) zu lösen. Solange das Grenzaufnahmevermögen (Sättigungskonzentration) des Lösungsmittels an gelöstem Stoff nicht erreicht ist, liegt nur eine einzige, flüssige Phase vor. Wird die Sättigungskonzentration überschritten, beginnt der gelöste Stoff auszukristallisieren. Es entsteht eine zweite, feste Phase; das Kristallat.

## Basiswissen

## Membrantrennverfahren

Im Vergleich zur Filtration lassen sich mit Membrantrennverfahren deutlich kleinere Stoffe (z.B. Viren und gelöste Ionen) aus dem Wasser entfernen. Triebkräfte für die Trennung können z.B. Konzentrations- oder Druckdifferenzen zwischen den beiden Seiten der Membran sein. Bei der Wasserbehandlung kommen folgende Membrantrennverfahren zum Einsatz:

Mikrofiltration

Ultrafiltration

Nanofiltration

Umkehrosiose

Die Druckdifferenz, der sogenannte transmembrane Druck, steigt in der oben genannten Reihenfolge an. Gleichzeitig nimmt die Trenngrenze, also die Größe der kleinsten abtrennbaren Stoffe, ab. Das gereinigte Rohwasser wird als Permeat, der zurückgehaltene Teil des Rohwassers als Retentat bezeichnet.

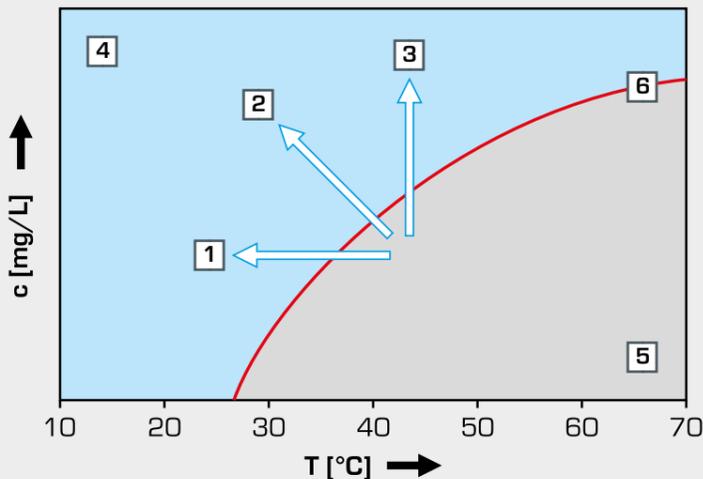
## Die Umkehrosiose

Von besonderer Bedeutung ist die Umkehrosiose. Mit diesem Grundverfahren lässt sich sehr reines Wasser erzeugen. Dieses Wasser ist für viele Prozesse in der Industrie erforderlich. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Meerwasserentsalzung.

Zum Verständnis der Umkehrosiose sei zunächst die Osmose an einem Beispiel erläutert (Abbildung). Zwei Salzlösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen sind durch eine halbdurchlässige (semipermeable) Membran voneinander getrennt. Die Membran ist nur für die Wassermoleküle durchlässig. Das Bestreben, Konzentrationsunterschiede auszugleichen, führt dazu, dass Wasser von links nach rechts durch die Membran strömt. Der Wasserspiegel steigt auf der rechten Seite so lange an, bis sich ein Gleichgewichtszustand, das sogenannte osmoti-

sche Gleichgewicht, eingestellt hat. Auf beiden Seiten der Membran liegt nun die gleiche Salzkonzentration vor. Die so entstandene hydrostatische Druckdifferenz zwischen beiden Seiten der Membran wird als osmotischer Druck bezeichnet.

Um die Strömungsrichtung des Wassers umzukehren (Umkehrosiose), muss der osmotische Druck überwunden werden. Dazu wird auf der rechten Seite der Membran ein Druck aufgebracht, der größer als der osmotische Druck ist. Das Wasser strömt dann von rechts nach links durch die Membran. Auf der rechten Seite erhält man das Retentat, auf der linken Seite das Permeat. Bei den genannten Anwendungsbeispielen sind Drücke bis zu 100 bar erforderlich.



Vereinfachte Darstellung der Grundverfahren der Kristallisation im Temperatur-Löslichkeits-Diagramm:

- T Temperatur  
c gelöste Stoffmenge  
1 Kühlungskristallisation  
2 Vakuumbildung  
3 Verdampfungskristallisation  
4 übersättigte Lösung  
5 untersättigte Lösung  
6 Löslichkeitskurve

Das Auskristallisieren kann mit drei Grundverfahren erreicht werden:

## ■ Kühlungskristallisation

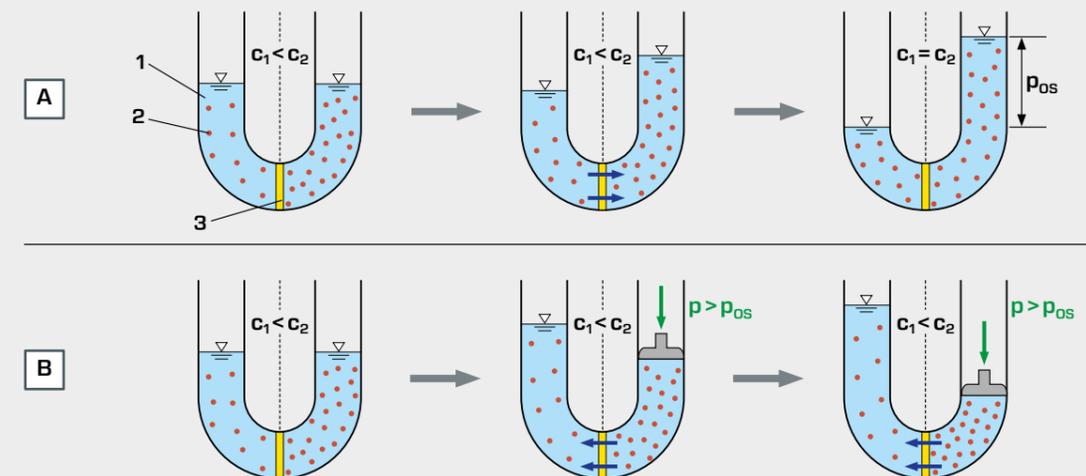
Wenn die Löslichkeit stark temperaturabhängig ist, kann die Sättigungskonzentration durch Abkühlen überschritten werden.

## ■ Verdampfungskristallisation

Es wird ein Teil des Lösungsmittels verdampft, bis die gelöste Stoffmenge in der Restlösung zur Überschreitung der Sättigungskonzentration führt. Dieses Grundverfahren wird verwendet, wenn die Löslichkeit nur geringfügig von der Temperatur abhängt.

## ■ Vakuumbildung

Bei diesem Grundverfahren nutzt man eine Kombination der oben genannten Effekte. Durch Entspannung im Vakuum verdampft ein Teil der Lösung. Der Entzug der hierfür nötigen Verdampfungswärme kühlt die Lösung zusätzlich ab. Dieses Grundverfahren ist vor allem für temperaturempfindliche Stoffe vorteilhaft, da die Verdampfung im Vakuum bei niedrigen Temperaturen stattfindet.



Grundprinzip der Osmose (A) und Umkehrosiose (B):

1 Wasser, 2 Salzionen, 3 semipermeable Membran, p Druck,  $p_{os}$  osmotischer Druck,  $c_1$  Salzkonzentration auf der linken Seite der Membran,  $c_2$  Salzkonzentration auf der rechten Seite der Membran

## CE 520

### Kühlungskristallisation



#### Beschreibung

- Kristallisation aus Lösungen
- Untersuchung des Kristallwachstums in einer Wirbelschicht
- transparente Materialien zur Beobachtung der Prozesse

Durch Kristallisation können gelöste Stoffe aus Lösungen in einen Feststoff umgewandelt und abgetrennt werden.

Dieser Versuchsstand ist in Zusammenarbeit mit dem **Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Prof. Dr. Ulrich)** entwickelt worden.

Eine Pumpe fördert eine gesättigte Kaliumsulfat-Lösung in einem Kreislauf mit Behälter. Um eine vorzeitige Kristallisation zu vermeiden, wird die Lösung mit Hilfe eines Heizkreislaufts über Sättigungstemperatur erwärmt. Beide Kreisläufe sind über zwei Wärmeübertrager verbunden. Über ein Ventil fließt ein kleiner Teil dieser übersättigten Lösung als Bypass durch die Kristallisationszelle. Dieser Teil der Lösung wird zur Kristallisation mit Kühlwasser über zwei Wärmeübertrager gekühlt. Durch die Absenkung der Temperatur gelangt die Lösung in einen übersättigten, metastabilen Zustand.

Die Kristallisationszelle ist ein Rohr, das an Ein- und Ausgang mit porösen Filtermedien versehen ist. Die herausnehmbare Zelle kann geöffnet werden, um Saatkristalle einzufüllen. Die porösen Filtermedien sind so gewählt, dass die Kristalle die Zelle nicht verlassen können. Durch die Strömungsverhältnisse entsteht in der Zelle eine Wirbelschicht. An den Saatkristallen kristallisiert das gelöste Kaliumsulfat aus der metastabilen Lösung aus. Die Kristalle wachsen. Durch Wiegen der Kristalle vor und nach dem Versuch und Erfassung der Zeit kann die Wachstumsgeschwindigkeit der Kristalle bestimmt werden.

Für den Ansatz einer gesättigten Kaliumsulfat-Lösung steht ein Rührbehälter mit Wärmeübertrager zur Verfügung. Die Temperaturen in den beiden Behältern und die zur Kristallisation notwendige Temperatur im Bypass werden mit Aufnehmern erfasst und geregelt.

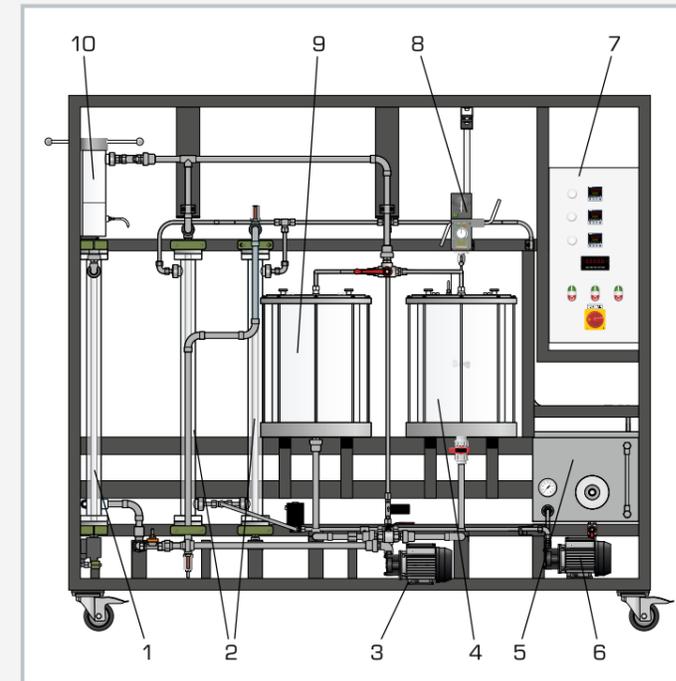
Zur Auswertung der Versuche werden ein Trockenschrank, eine Waage, eine Siebmaschine und ein Mikroskop empfohlen. Kaliumsulfat ist nicht im Lieferumfang enthalten.

#### Lerninhalte / Übungen

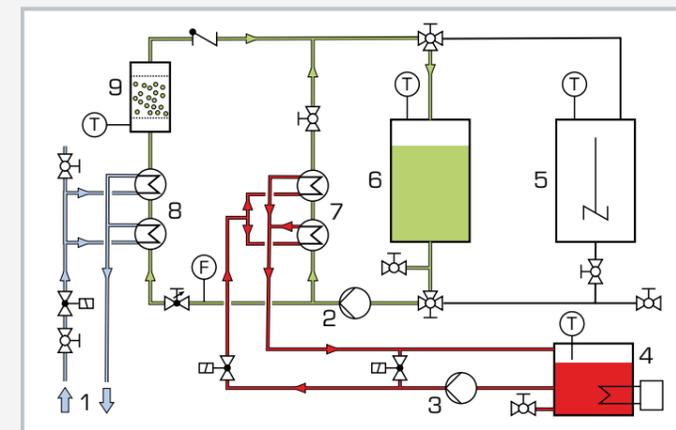
- Grundprinzip der Kühlungskristallisation
- Untersuchung der Einflussgrößen auf das Kristallwachstum
  - ▶ Übersättigung
  - ▶ Kristallisationsdauer

## CE 520

### Kühlungskristallisation



1 Wärmeübertrager Kühlen, 2 Wärmeübertrager Heizen, 3 Pumpe Lösung, 4 Behälter zum Ansetzen der gesättigten Lösung, 5 Behälter mit Heizer und Thermostat, 6 Pumpe Heizkreislauf, 7 Schaltschrank, 8 Rührer, 9 Behälter für übersättigte Lösung, 10 Kristallisationszelle



1 externes Kühlwasser, 2 Pumpe Lösung, 3 Pumpe Heizkreislauf, 4 Behälter mit Heizer und Thermostat, 5 Rührbehälter zum Ansetzen der gesättigten Lösung, 6 Behälter für übersättigte Lösung, 7 Wärmeübertrager Heizen, 8 Wärmeübertrager Kühlen, 9 Kristallisationszelle; T Temperatur, F Durchfluss

#### Spezifikation

- [1] Kristallisation aus Lösungen in einer Wirbelschicht
- [2] Rührbehälter zum Ansetzen einer gesättigten Lösung
- [3] Kreislauf für übersättigte Lösung mit Behälter, 2 Wärmeübertragern zum Heizen und Pumpe
- [4] Bypass für übersättigte, metastabile Lösung mit Kristallisationszelle und 2 Wärmeübertragern zum Kühlen
- [5] herausnehmbare und befüllbare Kristallisationszelle aus PMMA
- [6] Heizwasserkreislauf mit Pumpe, Behälter, Heizer und Thermostat
- [7] Einstellung des Durchflusses im Bypass über Ventile
- [8] Erfassung und Regelung der Temperaturen im Rührbehälter, im Behälter für übersättigte Lösung und in der Kristallisationszelle

#### Technische Daten

##### Behälter

- Rührbehälter: ca. 25L
- für übersättigte Lösung: ca. 25L
- Heizkreislauf: ca. 32L

##### Pumpe (Lösung)

- max. Förderstrom: ca. 18L/min
- max. Förderhöhe: ca. 38m

##### Pumpe (Heizkreislauf)

- max. Förderstrom: ca. 6L/min
- max. Förderhöhe: ca. 9m

##### Kristallisationszelle

- Durchmesser: ca. 40mm
- Höhe: ca. 80mm

Leistung Heizer: ca. 2kW

##### Messbereiche

- Temperatur: 3x 0...100°C, 1x 0...80°C
- Durchfluss: 1x 0...12L/min

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 2000x800x1850mm

Gewicht: ca. 255kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Kaltwasseranschluss: min. 3bar, max. 15°C; Abfluss

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Schlauch
- 1 Satz Werkzeuge
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 530 Umkehrosmose



Die Abbildung zeigt: Versorgungseinheit (links) und Versuchsstand (rechts), Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

### Beschreibung

- Membrantrennverfahren zur Gewinnung des Lösungsmittels aus einer Salzlösung
- Spiralwickelmodul zur Trennung
- Anlagensteuerung mit integrierter SPS
- integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone

Dieser Versuchsstand ist in Zusammenarbeit mit dem **Institut für Thermische Verfahrenstechnik der TU Hamburg-Hamburg** entwickelt worden. In einem Behälter mit Rührwerk wird eine NaCl-Lösung mit definierter Konzentration (bis max. 3,2%) angesetzt. Eine Pumpe fördert die Lösung zum Spiralwickelmodul. Die Pumpe erzeugt den zur Trennung notwendigen Druck.

Das Spiralwickelmodul besteht aus mehreren Membrantaschen. Eine Membrantasche besteht aus zwei Membranen, zwischen denen ein poröser Abstandhalter liegt. Die Membrantasche ist an drei Seiten geschlossen und an der vierten, offenen Seite an das perforierte Permeatsammelrohr angeschlossen. Zwischen den Taschen befinden sich weitere Abstandhalter, die den axialen Durchfluss der Salzlösung gewährleisten. Diese Abstandhalter sind gemeinsam mit den Membrantaschen spiralförmig um das Permeatsammelrohr gewickelt.

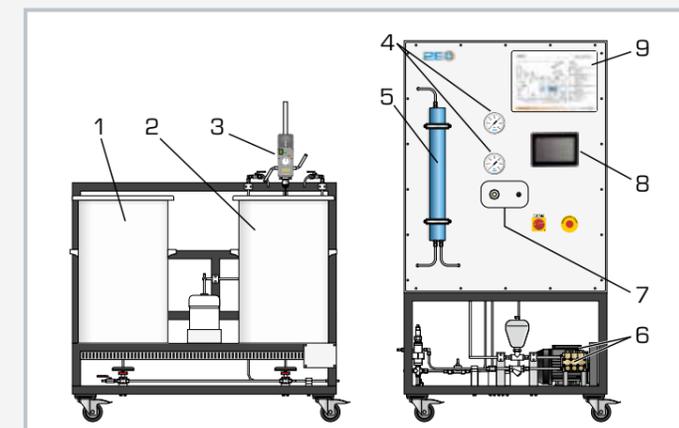
Die Salzlösung tritt an der Stirnfläche des Moduls ein und strömt axial zwischen den Taschen hindurch. Die semipermeable Membran ist für das Wasser (Permeat), jedoch nicht für das gelöste NaCl durchlässig. Der anliegende Druck presst das Wasser durch die Membran in die Taschen hinein. Es fließt darin spiralförmig dem Permeatsammelrohr zu und verlässt das Modul in axialer Richtung. Die Lösung wird durch die Abtrennung des Wassers auf ihrem Weg durch das Modul aufkonzentriert. Sie verlässt das Modul als Retentat. Das Retentat wird in den Rohwasserbehälter zurückgeführt. Das Permeat wird in einem separaten Behälter gesammelt. Die Salzkonzentrationen im Rohwasser, Retentat und Permeat werden durch Messung der jeweiligen Leitfähigkeit erfasst, um den Trennerfolg kontrollieren zu können.

Der Versuchsstand wird über Touchscreen von einer SPS gesteuert. Druck und Durchfluss werden über Ventile eingestellt. Mittels integrierten Router kann der Versuchsstand alternativ über ein Endgerät bedient und gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten möglich. Über direkte LAN-Anbindung können die Messwerte zusätzlich auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der GUNT-Software ausgewertet werden.

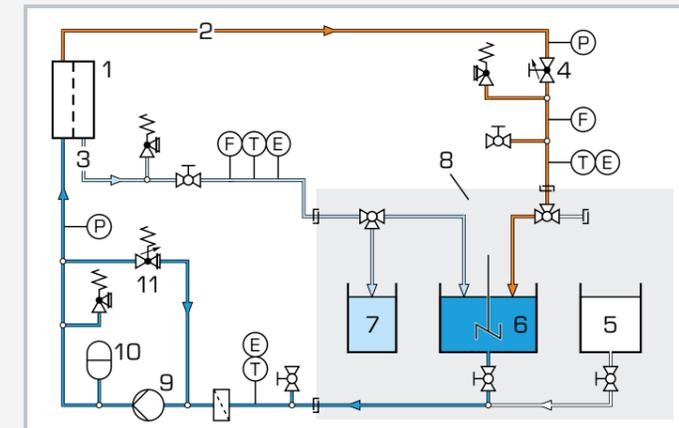
### Lerninhalte / Übungen

- Montage, Reinigung und Konservierung von Membranmodulen
- Grundprinzip der Umkehrosmose
  - ▶ Gesetz von Van't Hoff
- Durchfluss des Permeats und Rückhaltevermögens abhängig von
  - ▶ Druck im Rohwasser
  - ▶ Salzkonzentration im Rohwasser
  - ▶ Ausbeute
- Bestimmung von Diffusionskoeffizienten
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

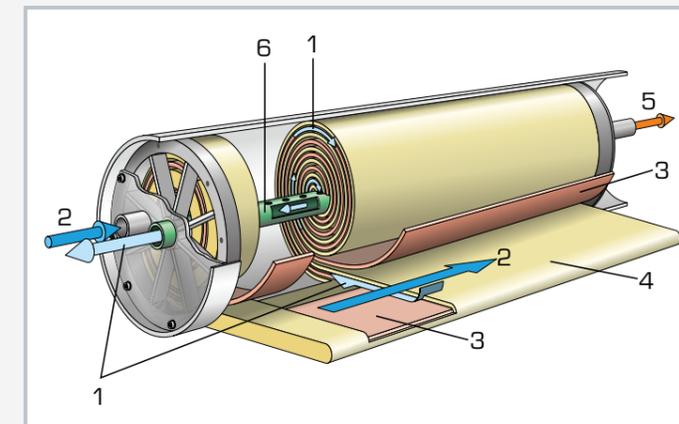
## CE 530 Umkehrosmose



1 Spülwasserbehälter (destilliertes Wasser), 2 Rohwasserbehälter (Salzlösung), 3 Rührwerk, 4 Manometer, 5 Spiralwickelmodul, 6 Pumpe mit Motor, 7 Ventile, 8 SPS mit Touchscreen, 9 Prozessschema



1 Spiralwickelmodul, 2 Retentat, 3 Permeat, 4 Ventil Retentat, 5 Spülwasser (destilliertes Wasser), 6 Rohwasser (Salzlösung), 7 Permeat, 8 Versorgungseinheit, 9 Pumpe, 10 Pulsationsdämpfer, 11 Überströmventil; P Druck, F Durchfluss, T Temperatur, E Leitfähigkeit



Spiralwickelmodul: 1 Permeat, 2 Rohwasser, 3 Abstandhalter, 4 Membrantasche, 5 Retentat, 6 Permeatsammelrohr

### Spezifikation

- [1] Abtrennung des Lösungsmittels aus einer Salzlösung mittels Umkehrosmose
- [2] Spiralwickelmodul aus Polyamid
- [3] Druckerzeugung: Kolbenpumpe + Pulsationsdämpfer
- [4] Überströmventil zur Einstellung des Drucks vor dem Spiralwickelmodul
- [5] Ventil zur Einstellung des Retentatdurchflusses
- [6] Sicherheitseinrichtung zum Schutz der Pumpe gegen Trockenlaufen
- [7] Anlagensteuerung mit einer SPS über Touchscreen
- [8] integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an bis zu 5 Endgeräten
- [9] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk
- [10] GUNT-Software zur Datenerfassung über LAN unter Windows 8.1, 10

### Technische Daten

SPS: Eaton XV-303

Spiralwickelmodul

- aktive Fläche: 1,2m<sup>2</sup>
  - Durchfluss Rohwasser: max. 1,4m<sup>3</sup>/h
  - Länge: ca. 533mm, Ø ca. 61mm
- Kolbenpumpe
- max. Förderstrom: ca. 585L/h
  - max. Förderdruck: ca. 140bar
  - max. Betriebsdruck: 58bar

Rührwerk

- Leistungsaufnahme: 130W
- Drehzahl: 50...1000min<sup>-1</sup>

Behälter

- Rohwasser (NaCl-Lösung bis max. 3,2%): ca. 110L
- Spülwasser (destilliertes Wasser): ca. 110L
- Permeat: ca. 5L

Messbereiche

- Durchfluss: 0,5...7,5L/min (Retentat), 0,05...1,8L/min (Permeat)
- Temperatur: 3x 0...60°C
- Druck: 4x 0...100bar (2x Manometer, 2x Aufnehmer)
- Leitfähigkeit: 3x 0...200mS/cm

230V, 50Hz, 1 Phase; 230V, 60Hz, 1 Phase

120V, 60Hz, 1 Phase; UL/CSA optional

LxBxH: 1250x1050x2100mm (Versuchsstand)

LxBxH: 1500x1050x1400mm (Versorgungseinheit)

Gesamtgewicht: ca. 290kg

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss, Natriumchlorid (NaCl), destilliertes Wasser, Natriumdisulfit (Konservierung des Membranmoduls), Natronlauge, Salzsäure, PC mit Windows empfohlen

### Lieferumfang

Versuchsstand, Versorgungseinheit, Membran, Konservierungsbehälter, 1 Satz Zubehör, 3x Leitfähigkeitsmessgerät, 1 GUNT-Software, 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Flüssig-Flüssig-Extraktion

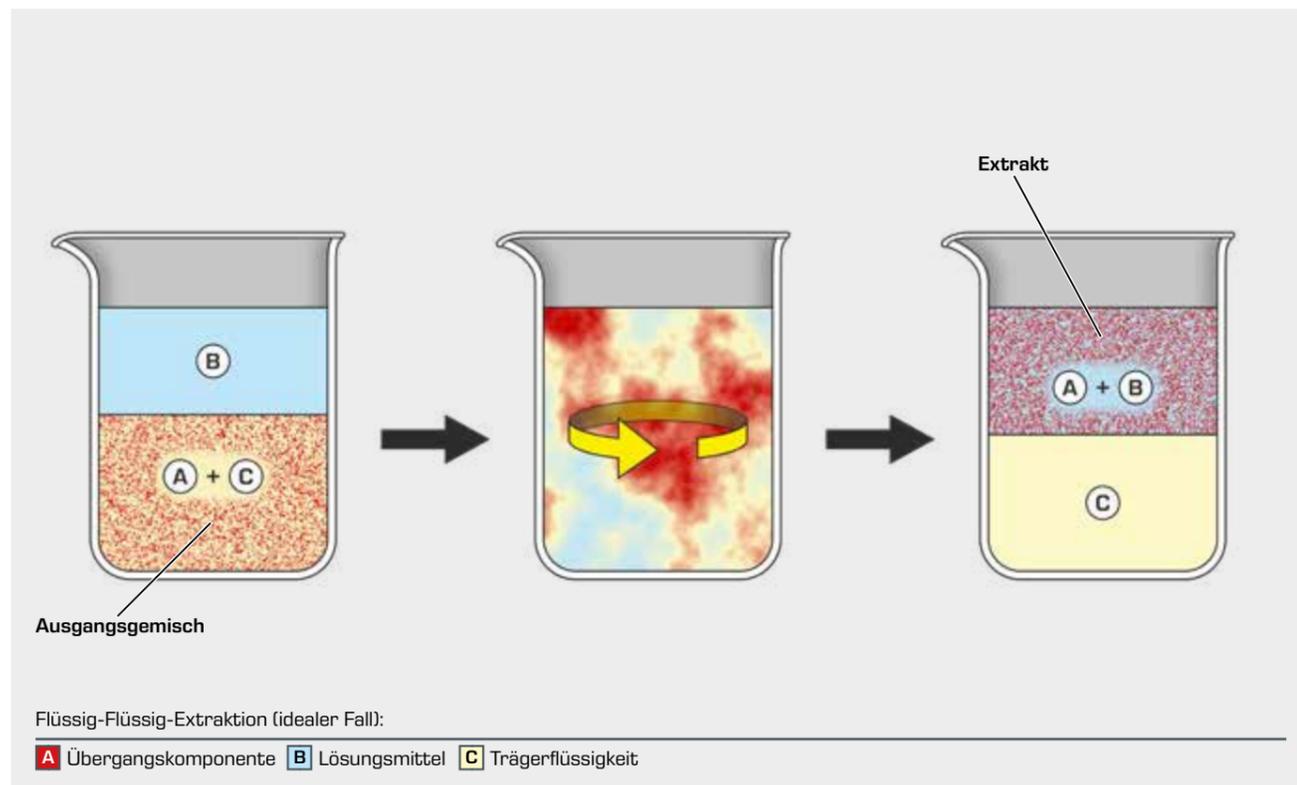
Bei der Flüssig-Flüssig-Extraktion wird aus einem Flüssigkeitsgemisch mit Hilfe eines flüssigen Lösungsmittels eine Flüssigkeitskomponente abgetrennt, die sich bevorzugt in dem Lösungsmittel löst. Einsatzgebiete sind z.B. die Abtrennung von Vitaminen aus wässrigen Lösungen und von Aromaten aus Erdölfraktionen.

Im einfachsten Fall sind drei Komponenten beteiligt:

- Übergangskomponente
- Lösungsmittel
- Trägerflüssigkeit

Die Übergangskomponente liegt gemeinsam mit der Trägerflüssigkeit als Ausgangsgemisch (Feed) vor. Werden das Ausgangsgemisch und das Lösungsmittel miteinander vermischt, geht die

Übergangskomponente in das Lösungsmittel über. Nach dem Absetzen erhält man zwei Phasen: Das Lösungsmittel mit der gelösten Übergangskomponente (Extrakt) und die Trägerflüssigkeit. Voraussetzung hierfür ist, dass die Löslichkeit der Übergangskomponente in dem Lösungsmittel höher ist als in der Trägerflüssigkeit. Die Trägerflüssigkeit wiederum sollte in dem Lösungsmittel nahezu unlöslich sein.



Die beispielhafte Darstellung geht von der idealen Vorstellung aus, dass die Übergangskomponente A vollständig von dem Lösungsmittel aufgenommen wird. In der Realität wird immer ein Rest der Übergangskomponente in der Trägerflüssigkeit zurückbleiben. Zudem wird von einer vollständigen Unlöslichkeit der Trägerflüssigkeit in dem Lösungsmittel ausgegangen. In Wirklichkeit werden immer Teile der einen Substanz in der jeweils anderen zu finden sein.

Daraus folgt, dass aus dem realen Trennprozess nach dem Absetzen zwei Phasen entstehen:

- **Extraktphase** (hauptsächlich A und B, Reste von C)
- **Raffinatphase** (hauptsächlich C, Reste von A und B)

Zur Gewinnung der möglichst reinen Übergangskomponente wird der Extraktion meist ein als Rektifikation gestalteter Trennschritt nachgeschaltet, in dem das Lösungsmittel von der Übergangskomponente abtrennt wird. Das Lösungsmittel kann recycelt werden und steht so wieder für die Extraktion zur Verfügung.

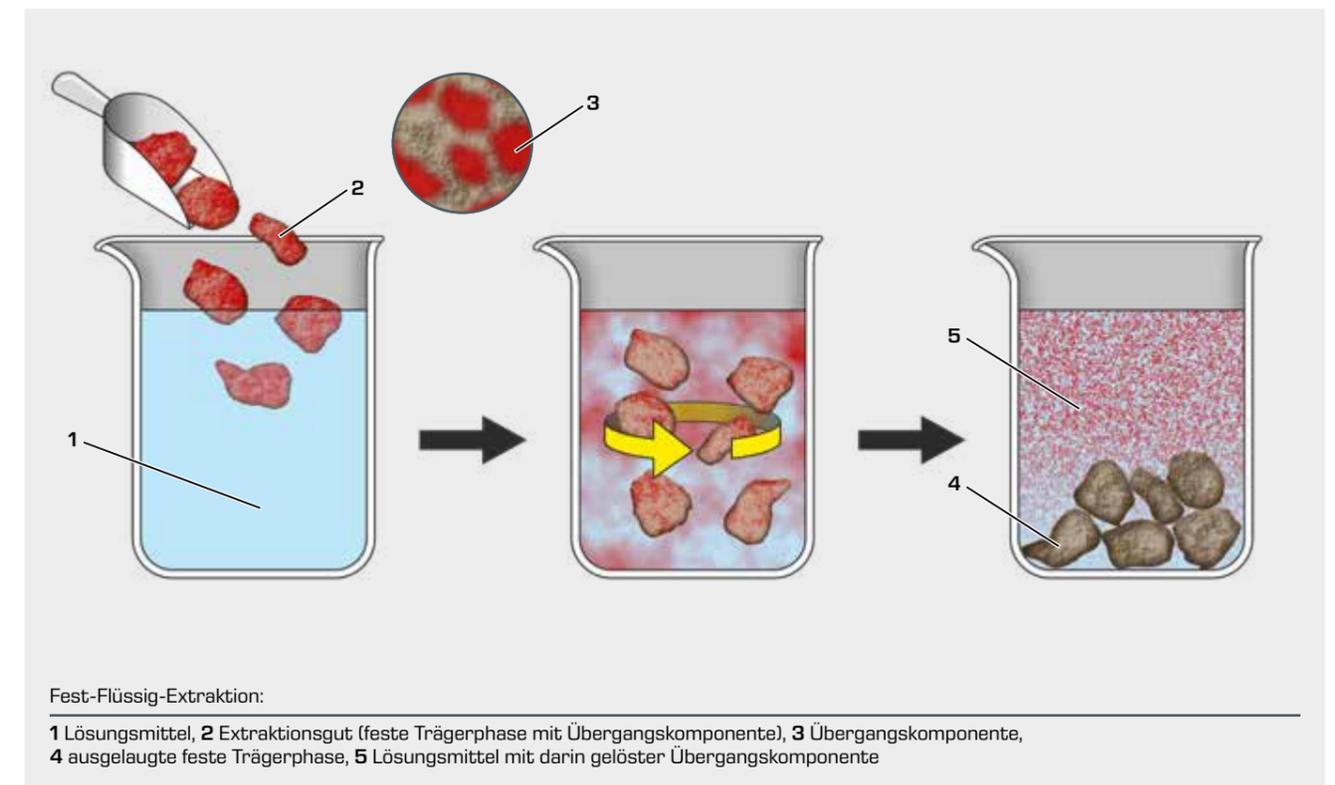
## Basiswissen

## Fest-Flüssig-Extraktion

Mit der Fest-Flüssig-Extraktion können lösliche Bestandteile mit Hilfe eines Lösungsmittels aus Feststoffen herausgelöst werden. Anwendungsgebiete des Grundverfahrens sind z.B. die Gewinnung von Öl aus Ölfrüchten oder das Auslaugen von Erzen.

Ein alltägliches Beispiel ist die Zubereitung von Kaffee. Dabei werden mit Wasser (Lösungsmittel) die Kaffeearomastoffe (Übergangskomponente) aus dem Kaffeepulver (Extraktionsgut, bestehend aus der festen Trägerphase und der Übergangskomponente) herausgelöst. Im Idealfall erhält man den trinkbaren Kaffee (Lösungsmittel mit darin gelösten Aromastoffen) und im Kaffeefilter bleibt das vollständig ausgelaugte Kaffeepulver (feste Trägerphase) zurück.

In Wirklichkeit wird die feste Trägerphase nach Beendigung der Extraktion immer noch einen Anteil der Übergangskomponente im Feststoff enthalten. Außerdem wird auch immer noch ein Anteil des Lösungsmittels an der festen Trägerphase adsorptiv gebunden bleiben.



Um eine möglichst schnelle und vollständige Extraktion des Feststoffes zu erreichen, müssen dem Lösungsmittel große Austauschflächen und kurze Diffusionswege geboten werden. Das kann durch das Zerkleinern des zu extrahierenden Feststoffes erreicht werden. Eine zu kleine Korngröße wiederum kann zur Verklumpung des Feststoffes und damit dem erschwerten Durchtritt des Lösungsmittels führen.

Bei der einfachsten Form dieses Grundverfahrens werden Extraktionsgut und Lösungsmittel gut vermischt. Anschließend wird das Lösungsmittel mit der darin gelösten Übergangskomponente abgetrennt und regeneriert.

Das Extraktionsgut kann auch als Festbett vorliegen und vom Lösungsmittel durchströmt werden. Bei einer weiteren Form der Anwendung wird das Extraktionsgut durch das Lösungsmittel bewegt.

Die Regeneration des Lösungsmittels erfolgt meist durch Verdampfung/Destillation. Dabei wird das Lösungsmittel verdampft und eine konzentrierte Extraktlösung bleibt als Produkt zurück. Das Lösungsmittel wird kondensiert und kann wiederverwendet werden.

## CE 620

### Flüssig-Flüssig-Extraktion



#### Lerninhalte / Übungen

- Übergang einer Komponente aus einem Zwei-Komponenten-Flüssigkeitsgemisch in ein Lösungsmittel durch Extraktion
- Scale-up vom Becherglas- zum Technikummaßstab
- Anreicherung der Übergangskomponente im Extrakt durch Destillation
- Bewertung der Trennprozesse über Konzentrationsmessungen und Massenbilanzen
- Einfluss von Versuchsvarianten auf die Trennprozesse

#### Beschreibung

- Trennung eines Flüssigkeitsgemisches durch Flüssig-Flüssig-Extraktion im Gegenstrom
- Anreicherung des Extraktes mit integrierter Destillationskolonne
- Betrieb als kontinuierlicher und diskontinuierlicher Prozess möglich
- Konstruktion und Werkstoffe ermöglichen Untersuchung verschiedener ternärer Systeme
- Einstellung und Beobachtung der Phasengrenze möglich

Mit CE 620 können Flüssigkeitsgemische mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion getrennt werden.

Aus dem Feedbehälter wird das zu trennende Flüssigkeitsgemisch mit einer Pumpe unten in die Extraktionskolonne gefördert.

Dort bewegt es sich im Gegenstrom zu dem Lösungsmittel, das mit einer Pumpe von oben in die Extraktionskolonne transportiert wird. Das zu trennende Gemisch besteht aus der Übergangskomponente und der Trägerflüssigkeit. Die Trägerflüssigkeit und das Lösungsmittel sind nicht ineinander löslich. Aus diesem Grund bildet sich in der Kolonne eine Phasengrenze aus. Diese kann mit zwei Ventilen eingestellt und beobachtet werden. Innerhalb der Kolonne findet der Übergang der Übergangskomponente in das Lösungsmittel statt. Über zwei Drei-Wege-Ventile kann der Versuchsstand als kontinuierlicher oder als diskontinuierlicher Prozess gefahren werden.

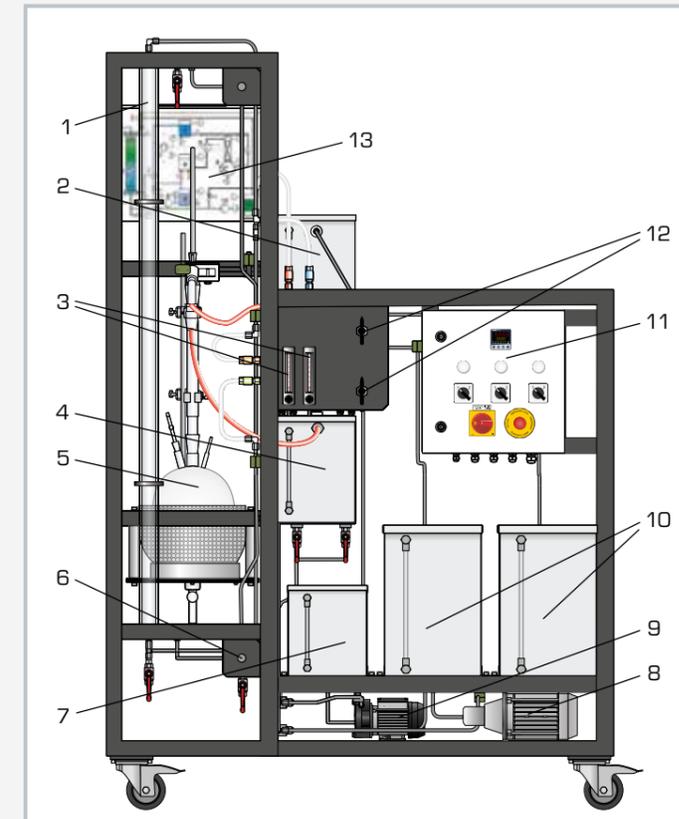
Eine Destillationseinheit dient der Anreicherung der Übergangskomponente im Extrakt. Sie besteht aus einem beheizten Rundkolben mit Füllkörperkolonne und einer Destillierbrücke mit Liebigkühler.

Das angereicherte Extrakt verlässt die Kolonne als Kopfprodukt und wird in einem Behälter gesammelt. Die Sumpftemperatur wird mit einem Aufnehmer erfasst, digital angezeigt und mit einem PID-Regler geregelt. Die Temperatur am Kopf der Destillationskolonne wird ebenfalls erfasst.

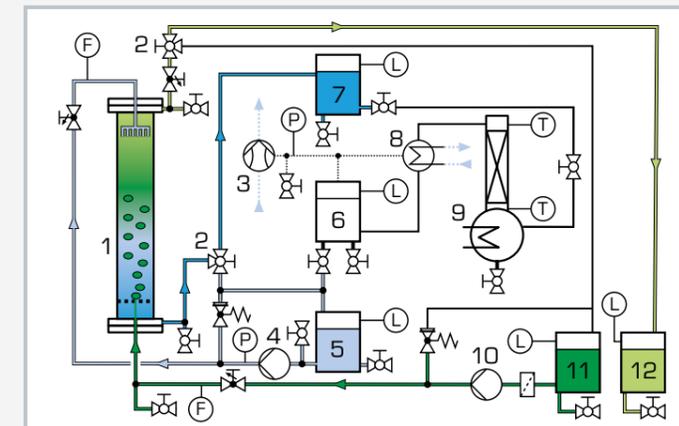
Als ternäres Stoffsystem wird Rapsöl als Trägerflüssigkeit, Ethanol als Übergangskomponente und Wasser als Lösungsmittel empfohlen. Die Konzentrationen in Extrakt, Kopf- und Sumpfprodukt für dieses ternäre Stoffsystem werden durch die Messung der Dichte bestimmt. Für alternative ternäre Stoffsysteme ist ein Leitfähigkeitsmessgerät im Lieferumfang enthalten.

## CE 620

### Flüssig-Flüssig-Extraktion



1 Extraktionskolonne, 2 Extraktbehälter, 3 Durchflussmesser Feed und Lösungsmittel, 4 Behälter Kopfprodukt (Destillation), 5 Destillationseinheit, 6 Ventil für Phasengrenze, 7 Lösungsmittelbehälter, 8 Feedpumpe, 9 Lösungsmittelpumpe, 10 Feed- und Raffinatbehälter, 11 Schaltschrank, 12 Drei-Wege-Ventile, 13 Prozessschema



1 Extraktionskolonne, 2 Drei-Wege-Ventile, 3 Wasserstrahlpumpe, 4 Lösungsmittelpumpe, 5 Lösungsmittelbehälter, 6 Behälter Kopfprodukt (Destillation), 7 Extraktbehälter, 8 Liebigkühler mit Kühlwasseranschluss, 9 Destillationskolonne, 10 Feedpumpe, 11 Feedbehälter, 12 Raffinatbehälter; F Durchfluss, P Druck, T Temperatur, L Füllstand

#### Spezifikation

- [1] Flüssig-Flüssig-Extraktion im Gegenstrom mit Destillation zur Anreicherung des Extrakts
- [2] Betrieb als kontinuierlicher oder als diskontinuierlicher Prozess über 2 Drei-Wege-Ventile
- [3] Extraktionskolonne aus Glas
- [4] Destillationskolonne und Destillierbrücke mit Liebigkühler
- [5] elektrische Sumpfheizung über PID-Regler
- [6] Wasserstrahlpumpe zur Senkung der Verdampfungstemperatur bei der Destillation
- [7] Behälter für Feed, Lösungsmittel, Raffinat, Extrakt und Kopfprodukt (Destillation) aus Edelstahl
- [8] 2 Pumpen zur Förderung des Feeds und des Lösungsmittels
- [9] 2 Ventile zur Einstellung der Phasengrenze
- [10] Destillationskolonne mit Raschigringen gefüllt
- [11] Zubehör geliefert im stabilen Aufbewahrungssystem mit Schaumstoffeinlage

#### Technische Daten

##### Kolonnen

- Extraktion: Ø 40mm, Höhe: 1500mm
- Destillation: Ø 30mm, Höhe: 415mm

Leistung Sumpfheizer: 1200W

##### Behälter

- Feed und Raffinat: je ca. 30L
- Lösungsmittel und Extrakt: je ca. 15L
- Kopfprodukt Destillation: 15L
- Sumpfbehälter Destillation: ca. 5L

##### Feedpumpe

- max. Förderstrom: 1000mL/min
- max. Förderhöhe: 80m

##### Lösungsmittelpumpe

- max. Förderstrom: 1200mL/min
- max. Förderhöhe: 10m

Wasserstrahlpumpe, Endvakuum: ca. 200mbar

##### Messbereiche

- Temperatur: 1x 0...150°C, 1x 0...120°C
- Durchfluss: 2x 100...850mL/min (Wasser)
- Druck: -1...0,6bar
- Leitfähigkeit: 0...1990µS/cm

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1350x750x2150mm

Gewicht: ca. 180kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss: 720L/h

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Leitfähigkeitsmessgerät
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 630

### Fest-Flüssig-Extraktion



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundprinzip der Fest-Flüssig-Extraktion
- Demonstration der Fest-Flüssig-Extraktion als kontinuierlicher und diskontinuierlicher Prozess
- Untersuchung des 1-, 2- und 3-stufigen Prozesses
- Einfluss von Lösungsmitteldurchfluss und -temperatur auf den Extraktionsprozess
- Einfluss von Extraktionsgutfördermenge und Extraktordrehzahl auf den Extraktionsprozess



#### Beschreibung

- **diskontinuierliche und kontinuierliche Fest-Flüssig-Extraktion**
- **ein-, zwei- oder dreistufiger Betrieb möglich**
- **regenerierbares Extraktionsgut**
- **GUNT-Software mit Steuerungsfunktionen und Datenerfassung**

Mit CE 630 können lösliche Komponenten eines Feststoffgemisches mit Hilfe eines rotierenden Extraktors extrahiert werden.

Im kontinuierlichen dreistufigen Betrieb wird aus einem Behälter reines Lösungsmittel (destilliertes Wasser) zum Sprinkler der ersten Extraktionsstufe gefördert und über dem Feststoffgemisch (Extraktionsgut) verteilt. Es sickert durch das Extraktionsgut, nimmt dessen lösliche Komponente (Kaliumhydrogencarbonat) auf und gelangt in Auffangsegmente.

Von dort wird das angereicherte Lösungsmittel zum Sprinkler der nächsten Stufe gefördert. Das mit der extrahierten Komponente beladene Lösungsmittel (Extrakt) wird nach der letzten Stufe im Extraktbehälter gesammelt. Das Extraktionsgut wird mit einem Schneckenförderer kontinuierlich in die Zellen des sich drehenden Extraktors gefüllt. Extraktionsgut und Lösungsmittel bewegen sich im Gegenstrom. Der ausgelaugte Extraktionsrückstand fällt nach einer Umdrehung des Extraktors in einen Behälter.

Über Ventile kann auch auf ein- oder zweistufigen, kontinuierlichen Betrieb umgeschaltet werden. Bei Stillstand des Extraktors ist diskontinuierlicher Betrieb möglich.

Für die Förderung des Lösungsmittels stehen drei Pumpen zur Verfügung, deren Drehzahl für jede Stufe individuell einstellbar ist. Die Temperatur des Lösungsmittels kann mit PID-Reglern ebenfalls für jede Stufe eingestellt werden. Zur Kontrolle des Trennprozesses ist jede Stufe mit Leitfähigkeitsaufnehmern ausgestattet. Alle Messwerte können über eine Software angezeigt werden.

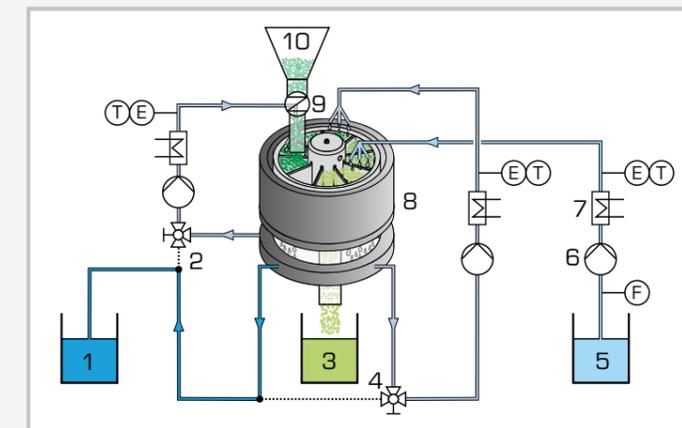
Das Feststoffgemisch (Extraktionsgut) wird vor dem Extraktionsversuch hergestellt. Das Trägermaterial (körniges Aluminiumoxid) wird in eine Salzlösung (Kaliumhydrogencarbonat in Wasser gelöst) gegeben. Das mit der Salzlösung getränkte Trägermaterial wird anschließend getrocknet.

## CE 630

### Fest-Flüssig-Extraktion



1 Prozessschema, 2 Schneckenförderer für Extraktionsgut, 3 rotierender Extraktor, 4 Antriebseinheit Extraktor, 5 Pumpe (hinter den Behältern), 6 Behälter, 7 Ventile zur Wahl der Betriebsart, 8 Heizer und Zugabe des Lösungsmittels, 9 Schaltschrank mit Bedienelementen



1 Extrakt, 2 Verbindung für zweistufigen Betrieb, 3 Extraktionsrückstand, 4 Verbindung für einstufigen Betrieb, 5 Lösungsmittel, 6 Pumpe, 7 Heizer, 8 rotierender Extraktor, 9 Schneckenförderer, 10 Extraktionsgut; T Temperatur, E Leitfähigkeit, F Durchfluss

#### Spezifikation

- [1] rotierender Extraktor zur kontinuierlichen und diskontinuierlichen Fest-Flüssig-Extraktion
- [2] Umschaltung auf 1-, 2- oder 3-stufigen Betrieb über Ventile möglich
- [3] Extraktordrehzahl über Potentiometer einstellbar
- [4] Schneckenförderer mit verstellbarer Drehzahl zur Einstellung der Fördermenge des Extraktionsguts
- [5] Durchfluss des Lösungsmittels für jede Stufe über Drehzahl von Pumpen einstellbar
- [6] Temperatur des Lösungsmittels für jede Stufe über PID-Regler einstellbar
- [7] Behälter für Extraktionsgut, Extraktionsrückstand, Lösungsmittel und Extrakt
- [8] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

#### Technische Daten

- Extraktor
- 9 Zellen
  - Ø Rotor: ca. 200mm
  - Drehzahl: ca. 0...9h<sup>-1</sup>
  - Leistungsaufnahme Motor: ca. 0,9W
- Schneckenförderer
- max. Fördermenge: ca. 20L/h
  - Leistungsaufnahme Motor: ca. 4W
- 4 Schlauchpumpen
- max. Förderstrom: ca. 25L/h bei 300min<sup>-1</sup> und Schlauch 4,8x1,6mm
- 3 Heizer
- Leistungsaufnahme: ca. 330W
- Behälter
- Extraktionsgut: ca. 5L
  - Extraktionsrückstand, Lösungsmittel, Extrakt: je ca. 20L

#### Messbereiche

- Durchfluss: 1x 0,025...0,5L/min
- Leitfähigkeit: 4x 0...20mS/cm
- Temperatur: 4x 0...50°C

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1360x780x1900mm  
Gewicht: ca. 150kg

#### Für den Betrieb erforderlich

PC mit Windows empfohlen

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Werkzeuge
- 1 Gebinde Aluminiumoxid
- 1 Gebinde Kaliumhydrogencarbonat
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

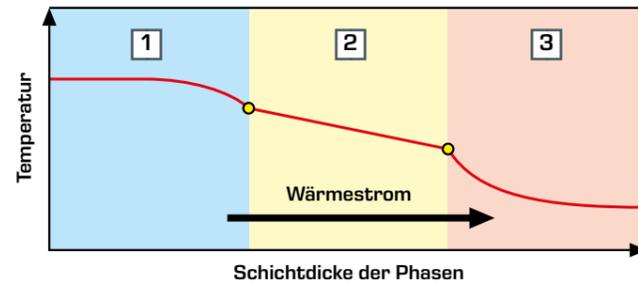
Basiswissen  
Stoffübertragung

Die Stoffübertragung ist Teil verschiedener Grundverfahren. Beispielsweise sind dies Trocknungsprozesse, Absorptionen und Adsorptionen.

Betrachtete Stoffsysteme oder Mischungen streben einen energetisch möglichst geringen Zustand an. Dieses Bestreben wird auch als treibendes Gefälle bezeichnet. Für beispielsweise eine Kochsalzlösung bedeutet dies, dass sich die gelösten Salzionen gleichmäßig verteilen. Nach einiger Zeit wird an jeder Stelle die gleiche Konzentration messbar sein.

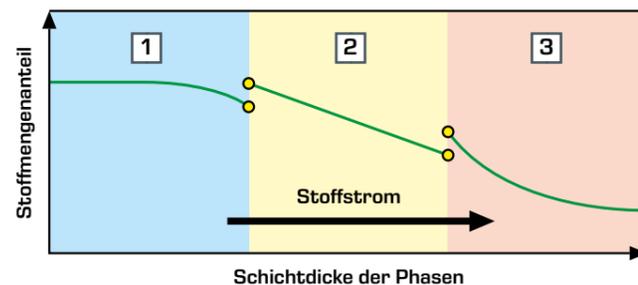
Die Betrachtung einer **Stoffübertragung** aus mehreren Stofftransportprozessen, wie Diffusion oder konvektivem Stoffübergang, wird als **Stoffdurchgang** bezeichnet.

Die Beschreibung der Stoffübertragung erfolgt mit den einzelnen Stofftransportprozessen analog den Wärmetransportprozessen. Die beiden Diagramme zeigen die Profile von Temperatur und Stoffmengenanteil sowie die jeweils vorliegenden Transportprozesse für ebene Phasen.



Ideale Wärmeübertragung mit drei ebenen Phasen:

1, 3 Wärmeübergang, 2 Wärmeleitung



Stoffübertragung mit drei ebenen Phasen:

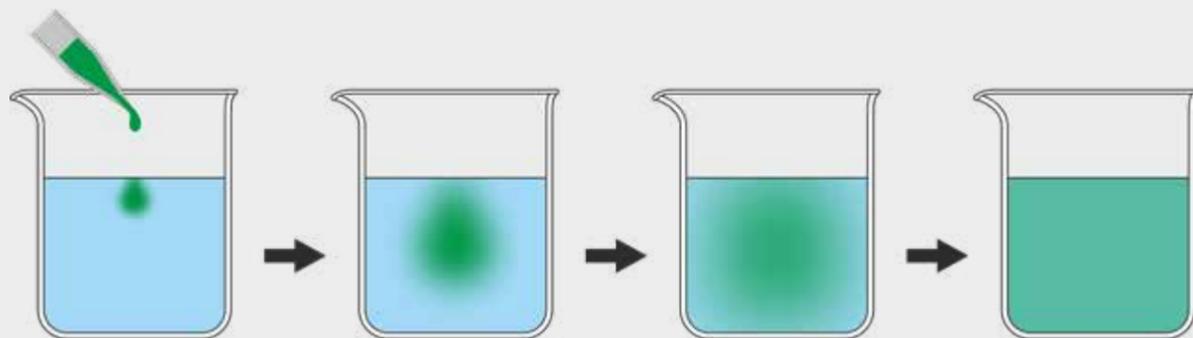
1, 3 Stoffübergang, 2 Diffusion

## Diffusion

Diffusion ist ein physikalischer Prozess, bei dem Atome oder Moleküle innerhalb eines Gases, einer Lösung oder auch eines Feststoffes wandern. Diffusion ist ein **Stofftransportprozess**, der auf der Molekularbewegung beruht und ein Weg zum Erreichen des energieärmsten Zustandes ist. Allgemein setzt die Diffusion eine lokale Differenz der Teilchenzahl dichte voraus, welche als treibendes Gefälle wirkt. Diffusionsvorgänge enden dann, wenn ein Ausgleich aller Teilchenzahl dichten erreicht ist. In Lösungen dauert dies in der Regel mehrere Stunden, in Gasen hingegen oft nur wenige Sekunden.

Die Berechnung erfolgt mit Diffusionskoeffizienten, die für die beteiligten Stoffe zu ermitteln sind. Der Diffusionskoeffizient beschreibt die Beweglichkeit eines Stoffes innerhalb eines anderen Stoffes oder Stoffgemisches. Bei einer Kochsalzlösung beispielsweise also die Beweglichkeit der Salzionen innerhalb des Wassers.

Die Diffusion kann zusätzlich durch die Temperatur und den Druck beeinflusst werden. Die Abhängigkeit von der Temperatur ist meist Teil der Berechnungsgleichung. Der Druck wird als zusätzliche Angabe genannt, um die Gültigkeit der Berechnungsgleichung für den Anwendungsfall zu prüfen.



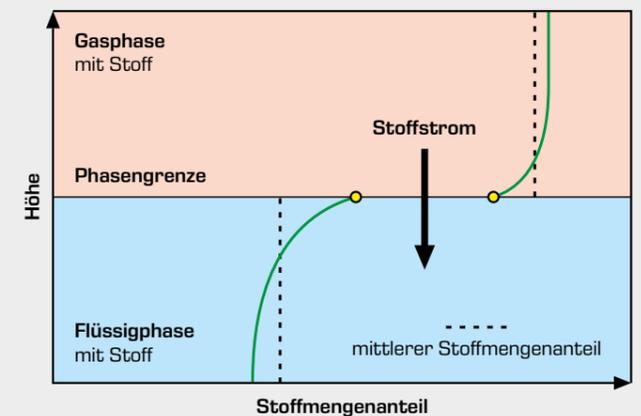
## Stoffdurchgang

Eine Aufgabenstellung mit Stoffübertragung beinhaltet üblicherweise mehrere zu betrachtende Stofftransportabschnitte. Der Transportprozess durch alle Abschnitte hindurch wird als **Stoffdurchgang** bezeichnet. Die einzelnen Stofftransportprozesse sind die Diffusion und der Stoffübergang. Innerhalb einer Aufgabenstellung können diese auch mehrfach auftreten.

## Beispiel mit zweifachem Stoffübergang

Eine Gasphase befindet sich über einer Flüssigphase. Beide Phasen strömen. In der Gasphase ist ein Stoff vorhanden, der in der Flüssigphase löslich ist. Sofern der energieärmste Zustand noch nicht erreicht ist, wird dieser versucht zu erreichen. In diesem Fall findet ein Stoffdurchgang des Stoffes aus der Gasphase in die Flüssigphase statt. In der Gasphase findet ein Stoffübergang an die Phasengrenze heran statt und in der Flüssigphase ein Stoffübergang von der Phasengrenze weg. Die Stoffmengenanteile werden sich bis zum Gleichgewicht anpassen. Die Berechnung des Stoffstroms erfolgt mit den Stoffübergangskoeffizienten und dem treibenden Gefälle, das mit der Differenz der Stoffmengenanteile an der Phasengrenze und dem mittleren Wert innerhalb der Phase gebildet wird.

Eine Besonderheit bei der Stoffübertragung ist, dass die Löslichkeit eines Stoffes in anderen Stoffen unterschiedlich ist. Dies bedeutet, dass die Konzentrationen an den Phasengrenzen unterschiedlich sind.



## Konvektiver Stoffübergang

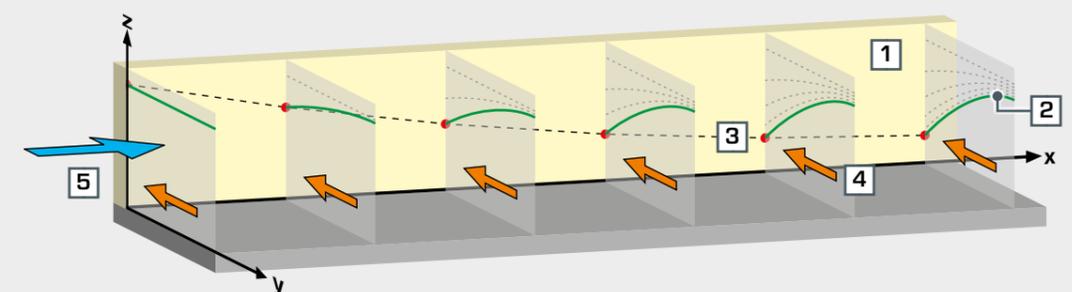
Der konvektive Stoffübergang ist ein Stofftransportprozess, der bei gleichzeitigem Auftreten einer Strömung stattfindet. Die Strömung führt zu einer deutlich besseren Stoffübertragung, so dass für die Auslegung weitere Gleichungen ermittelt wurden. Die maßgeblichen Einflüsse für den Stoffübergang sind:

- Strömungszustand (laminar oder turbulent)
- Grad der Strömungsbildung
- Grad der Profilausbildung der Stoffmengenanteile

Je nach den vorliegenden Bedingungen wird für die Berechnung des Stoffübergangskoeffizientens die **Sherwood-Zahl** zusammen mit der gültigen Sherwood-Funktion verwendet.

## Beispiel

Eine Flüssigphase mit einem Stoff fließt entlang einer Membran. Der Stoff wird von der Membran aufgenommen. Im Anlauf der Profilausbildung ist der Stoffmengenanteil konstant und sinkt im weiteren Verlauf ab. Da der Stoff von der Membran aufgenommen wird, sinkt der Stoffmengenanteil direkt an der Membran stärker als in der weiteren Strömung ab. Das sich ergebende Profil der Stoffmengenanteile, quer zu der Strömungsrichtung, stellt einen weiteren Stofftransportwiderstand dar. Dieser wird durch den zu berechnenden Stoffübergangskoeffizienten in der Gesamtbetrachtung, dem Stoffdurchgang, berücksichtigt.



x Strecke in Strömungsrichtung, y Abstand von der Membran, z Stoffmengenanteil

1 Membran, 2 Stoffmengenanteil in Abhängigkeit vom Abstand zur Membran (y),  
3 Stoffmengenanteil in unmittelbarer Nähe der Membran (y=0), 4 Stoffstrom zur Membran, 5 Strömung

## CE 110

### Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen



#### Beschreibung

- diffusiver Stofftransport in Gasen und wässrigen Lösungen
- Anwendung des Fick'schen Gesetzes

Diffusion ist der mikroskopische Stofftransport von Teilchen wie Atomen, Molekülen und Ionen aufgrund von Konzentrationsunterschieden. Sie spielt eine große Rolle in vielen verfahrenstechnischen Prozessen. So kann die Diffusion z.B. die Reaktionspartner bei chemischen Reaktionen zusammen bringen und in einigen Fällen der geschwindigkeitsbestimmende Schritt für den Prozess sein.

CE 110 enthält je ein Versuchsgerät zur Untersuchung der Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen. Zur Untersuchung der Diffusion in Flüssigkeiten wird eine konzentrierte Salzlösung verwendet. Sie befindet sich in einem U-Rohr, an dessen einem Ende sich eine Scheibe mit mehreren vertikalen Kapillaren befindet. Das U-Rohr wird in einen Behälter mit demineralisiertem Wasser getaucht, so dass die Scheibe mit den Kapillaren sich unterhalb der Wasseroberfläche befindet. Aufgrund des Konzentrationsgradienten zwischen Wasser und der Lösung bewegen sich die Salzionen aus dem U-Rohr durch die Kapillaren in das demineralisierte Wasser.

Die Kapillaren gewährleisten die eindimensionale Bewegung der Ionen. Ein Rührer im Behälter verhindert eine Erhöhung der Salzkonzentration nahe der Scheibe und verhindert so Konzentrationsunterschiede im Behälter. Ein Leitfähigkeitsmessgerät erfasst die Salzkonzentration im Behälter.

Zur Untersuchung der Diffusion in Gasen wird ein leichtflüchtiges Lösungsmittel verwendet. Es befindet sich in einem vertikalen Rohr, das in ein beheiztes Wasserbad getaucht wird. Durch die Wärmeenergie aus dem Wasserbad verdunstet das Lösungsmittel. Ein Gebläse erzeugt einen Luftstrom, der sich am oberen Ende des Rohrs horizontal bewegt.

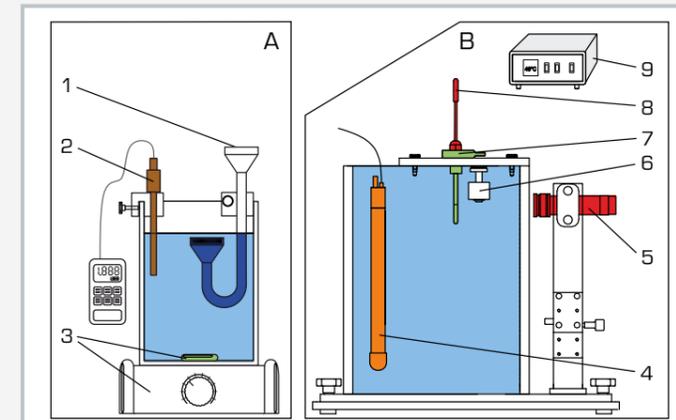
Das gasförmige Lösungsmittel diffundiert durch den Konzentrationsgradienten von der Oberfläche des flüssigen Lösungsmittels aufwärts zu dem reinen Luftstrom. Der Luftstrom transportiert die Lösungsmittelmoleküle ab und sorgt so für eine konstante Konzentration am oberen Ende des Rohrs. Mit der Zeit verringert sich das Volumen des flüssigen Lösungsmittels im Rohr. Ein Mikroskop mit Skala ermöglicht die Bestimmung des Füllstands. Ein Heizer mit Regler hält die Temperatur im Wasserbad konstant.

#### Lerninhalte / Übungen

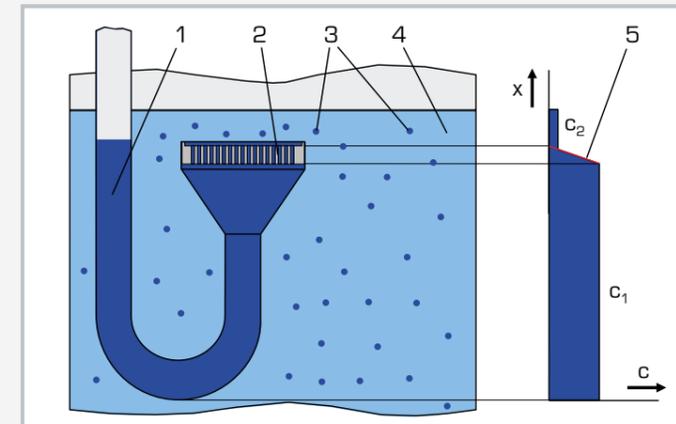
- Grundlagen der Diffusion: Fick'sches Gesetz
- Herleitung der Berechnungsformeln für die Diffusionskoeffizienten bei den gegebenen experimentellen Randbedingungen
- Bestimmung des Diffusionskoeffizienten für den Stofftransport im Gas
- Bestimmung des Diffusionskoeffizienten für den Stofftransport in Flüssigkeit

## CE 110

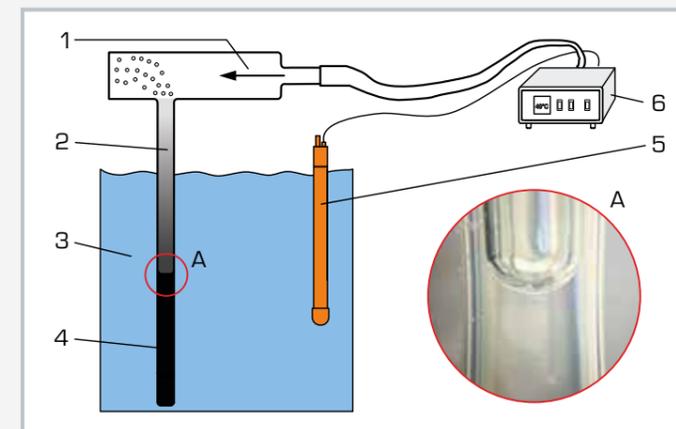
### Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen



Geräte zur Diffusion in Flüssigkeiten (A) und in Gasen (B): 1 U-Rohr mit Kapillaren, 2 Aufnahmeleitfähigkeit, 3 Magnetrührer mit Rührfisch, 4 Heizer im Wasserbad, 5 Mikroskop, 6 Schwimmerschalter, 7 Diffusionsrohr, 8 Aufnahme Temperatur, 9 Anzeige- und Bediengerät.



Diffusion in Flüssigkeiten: 1 konzentrierte Salzlösung, 2 Kapillaren, 3 Salzionen, 4 Wasser, 5 Konzentrationsgradient; x Weg, c Konzentration,  $c_1$  konzentrierte Lösung,  $c_2$  verdünnte Lösung



Diffusion in Gasen: 1 Luftstrom, 2 gasförmiges Lösungsmittel, 3 Wasserbad, 4 flüssiges Lösungsmittel, 5 Heizer, 6 Anzeige- und Bediengerät; A Meniskus im Mikroskop

#### Spezifikation

- [1] Untersuchung der Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen
- [2] transparenter Behälter mit Magnetrührer, Leitfähigkeitsmessgerät und U-Rohr mit Kapillaren zur Untersuchung der Diffusion in wässrigen Lösungen
- [3] Verdunstung eines leichtflüchtigen Lösungsmittels mit Diffusionsrohr im beheizten Wasserbad zur Untersuchung der Diffusion in Gasen
- [4] Abtransport des gasförmigen Lösungsmittels am oberen Ende des Diffusionsrohrs mit Gebläse
- [5] Heizer mit Regler und Aufnahme zur Einstellung der Temperatur im Wasserbad
- [6] höhenverstellbares Mikroskop zur Beobachtung und Bestimmung des Lösungsmittelvolumens im Diffusionsrohr
- [7] separates Anzeige- und Bediengerät enthält Temperaturanzeige und Gebläse

#### Technische Daten

Behälter mit Rührer: ca. 1500mL  
Drehzahl Rührer: 0...1500min<sup>-1</sup>  
253 Kapillaren aus Edelstahl  
■ Durchmesser: 1mm, Länge: 5mm

Wasserbad: ca. 2L  
Diffusionsrohr für Lösungsmittel  
■ Durchmesser: 3,4mm, Länge: 85mm

Leistung Heizer: ca. 125W  
Gebläse: 120...320L/h  
Teilung Skala Mikroskop: 0,1mm

Messbereiche  
■ Temperatur: 0...100°C  
■ Leitfähigkeit: 0...200mS/cm

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 210x210x280mm  
(Versuchsgerät zur Diffusion in Flüssigkeiten)  
LxBxH: 220x290x450mm  
(Versuchsgerät zur Diffusion in Gasen)  
LxBxH: 370x340x200mm  
(Leitfähigkeitsmessgerät)  
Gewicht: ca. 16kg

#### Lieferumfang

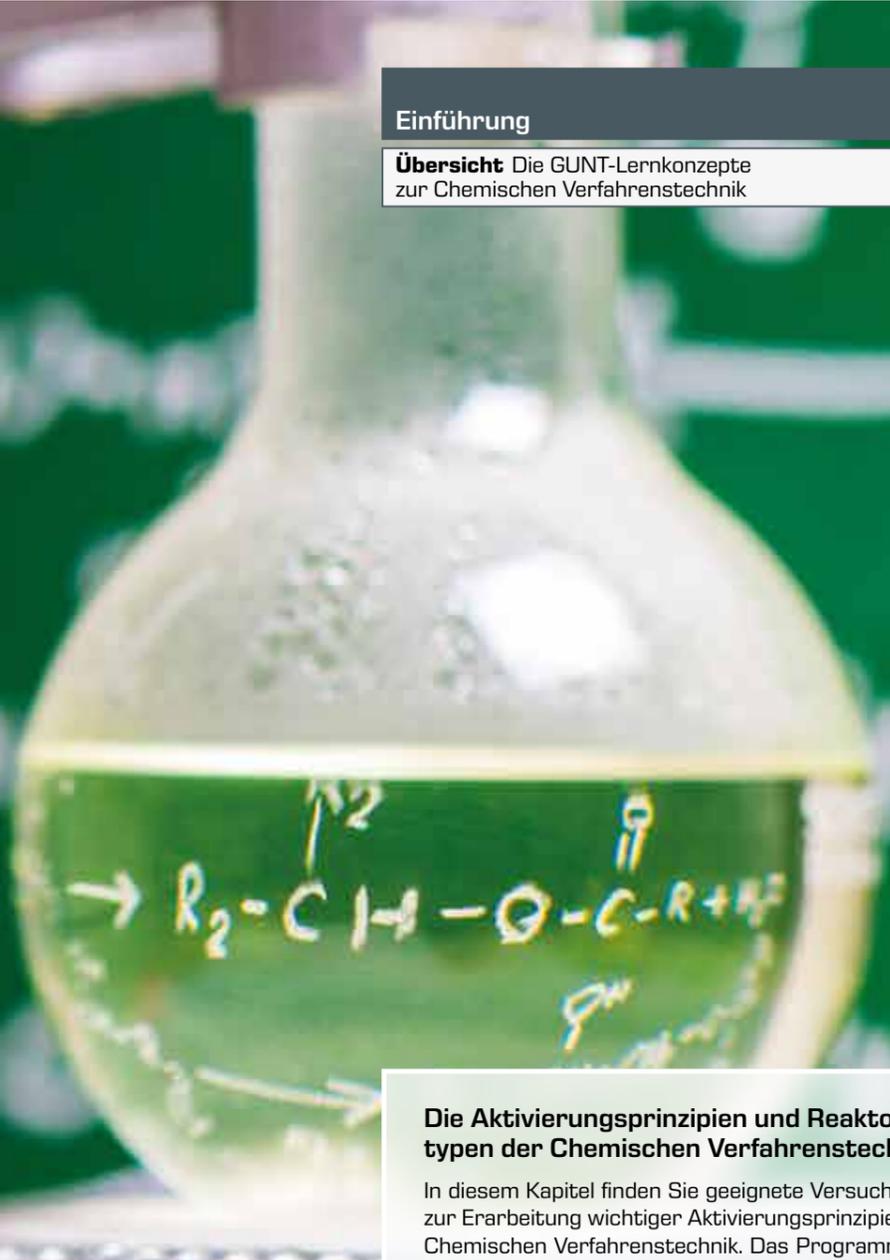
- 1 Versuchsgerät zur Diffusion in Flüssigkeiten
- 1 Versuchsgerät zur Diffusion in Gasen
- 1 Anzeige- und Bediengerät
- 1 Leitfähigkeitsmessgerät
- 1 Magnetrührer mit 2 Rührfischen
- 1 Stoppuhr
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

Einführung	
<b>Übersicht</b> Die GUNT-Lernkonzepte zur Chemischen Verfahrenstechnik	136

Thermische Aktivierung	
<b>Übersicht</b> CE 310 Das modulare System für die Chemische Verfahrenstechnik	138
<b>CE 310</b> Versorgungseinheit chemische Reaktoren	140
<b>CE 310.01</b> Kontinuierlicher Rührkesselreaktor	142
<b>CE 310.02</b> Strömungsrohrreaktor	144
<b>CE 310.03</b> Rührkesselkaskade	146
<b>CE 310.04</b> Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor	148
<b>CE 310.05</b> Reaktor mit Kolbenströmung	150
<b>CE 310.06</b> Reaktor mit laminarer Strömung	152
<b>CE 100</b> Strömungsrohrreaktor	154

Katalytische Aktivierung	
<b>Basiswissen</b> Katalytische Aktivierung	157
<b>Übersicht</b> CE 380 Festbettkatalyse	158
<b>CE 380</b> Festbettkatalyse	160
<b>CE 380.01</b> Fließinjektionsanalyse	162
<b>CE 650</b> Biodieselanlage	164

Fotochemische Aktivierung	
<b>Basiswissen</b> Fotochemische Aktivierung	166
<b>Übersicht</b> CE 584 Erweiterte Oxidation	167
<b>CE 584</b> Erweiterte Oxidation	168



### Die Aktivierungsprinzipien und Reaktortypen der Chemischen Verfahrenstechnik

In diesem Kapitel finden Sie geeignete Versuchsgерäte zur Erarbeitung wichtiger Aktivierungsprinzipien in der Chemischen Verfahrenstechnik. Das Programm bietet außerdem alle Möglichkeiten, die Funktionsweise, die Anwendungsbereiche und die Unterschiede der gängigen Reaktortypen kennenzulernen. Bei der Auswahl der Reaktionen wurde Wert auf den einfachen Nachweis der Produkte und möglichst ungefährliche Chemikalien gelegt. Dennoch erfordert der Umgang mit den Chemikalien Übung, Sorgfalt und ein geeignetes Laborumfeld. Abhängig vom jeweiligen Prozess und den eingesetzten Stoffen sind versiegelte Böden, Abflüsse, Wasserversorgung, Lüftungen, sichere Lagereinrichtungen für die eingesetzten Stoffe, Sicherheitseinrichtungen und Schutzkleidung erforderlich.

Zur Auswertung vieler Versuche benötigen Sie – über den Lieferumfang der GUNT-Lehrsysteme hinausgehend – Systeme für die professionelle Analysetechnik.

Sprechen Sie mit uns – wir beraten Sie gern.



## Die GUNT-Lernkonzepte zur Chemischen Verfahrenstechnik

### Womit beschäftigt sich die Chemische Verfahrenstechnik?

Im Gegensatz zur Mechanischen oder Thermischen Verfahrenstechnik steht in der Chemischen Verfahrenstechnik nicht die Änderung von Stoffeigenschaften oder Stoffzusammensetzungen im Vordergrund. Zentraler Gegenstand der Chemischen Verfahrenstechnik ist die Erzeugung einer neuen Stoffart durch chemische Reaktionen.

Aus der Chemie stammen die Kenntnisse, welche Reaktionspartner für ein gewünschtes Produkt benötigt werden. Die Chemie liefert außerdem die Kenntnisse für die Bedingungen, die einen optimalen Ablauf der gewünschten chemischen Reaktion ermöglichen.

Zu diesen Bedingungen gehören die Aktivierung der Reaktion, die Einstellung von Druck und Temperatur sowie die Zusammensetzung der Reaktionspartner. Die Chemische Verfahrenstechnik hat die Aufgabe, diese Bedingungen bei der großtechnischen Nutzung bereitzustellen. Neben diesen Bedingungen hat auch der Aggregatzustand der Reaktionspartner und Reaktionsprodukte einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Reaktoren und des Produktionsprozesses insgesamt.

### Wie lassen sich die chemischen Verfahren einteilen?

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die chemischen Verfahren einteilen. Eine dieser Möglichkeiten bezieht sich auf die Aktivierungsenergie. Viele thermodynamisch mögliche chemische Reaktionen laufen gar nicht oder zu langsam für die technische Nutzung ab, wenn nicht eine gewisse Aktivierungsenergie aufgebracht wird.

Die Aktivierung von chemischen Reaktionen kann nach unterschiedlichen Prinzipien erfolgen. Das Aktivierungsprinzip beeinflusst die konstruktive Gestaltung und den Betrieb chemischer Reaktoren erheblich. Unterschiedliche Aktivierungsprinzipien können auch kombiniert eingesetzt werden:

#### ■ Thermische Aktivierung

Die zur Aktivierung der chemischen Reaktion notwendige Energie kann durch Wärme eingebracht werden. Die Einstellung eines gewünschten Temperaturbereiches erfolgt durch Heizen bzw. Kühlen. In diesem Temperaturbereich läuft die Reaktion optimal ab und unerwünschte Nebenreaktionen werden vermieden.

#### ■ Katalytische Aktivierung

Viele Reaktionen laufen bei Umgebungstemperatur für eine technische Nutzung zu langsam ab, weil ihre Aktivierungsenergien sehr hoch sind. Katalysatoren senken die Aktivierungsenergie und beschleunigen die chemische Reaktion. Man unterscheidet zwei Arten der Katalyse:

##### ► Homogene Katalyse

Der Katalysator und die Ausgangsstoffe der chemischen Reaktion liegen in der gleichen Phase vor.

##### ► Heterogene Katalyse

Der Katalysator liegt meist in fester Form vor. Die Ausgangsstoffe der Reaktion liegen in flüssiger oder gasförmiger Phase vor.

#### ■ Fotochemische Aktivierung

Die Aktivierung der Reaktion erfolgt, indem Atome oder Moleküle optische Strahlung absorbieren. Die zumeist organischen Stoffe erreichen durch die Absorption einen energie-reicheren, aktivierten Zustand.



Versorgungseinheit Chemische Reaktoren CE 310 mit CE 310.01 Kontinuierlicher Rührkesselreaktor

### Unsere Lehrsysteme für die Chemische Verfahrenstechnik

#### Thermische Aktivierung

CE 310.01	Kontinuierlicher Rührkesselreaktor
CE 310.02	Strömungsrohrreaktor
CE 310.03	Rührkesselkaskade
CE 310.04	Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor
CE 310.05	Reaktor mit Kolbenströmung
CE 310.06	Reaktor mit laminarer Strömung
CE 100	Strömungsrohrreaktor

#### Katalytische Aktivierung

CE 380	Festbettkatalyse
CE 650	Biodieselanlage

#### Fotochemische Aktivierung

CE 584	Erweiterte Oxidation
--------	----------------------

### Abstrakte Prozesse anschaulich präsentiert

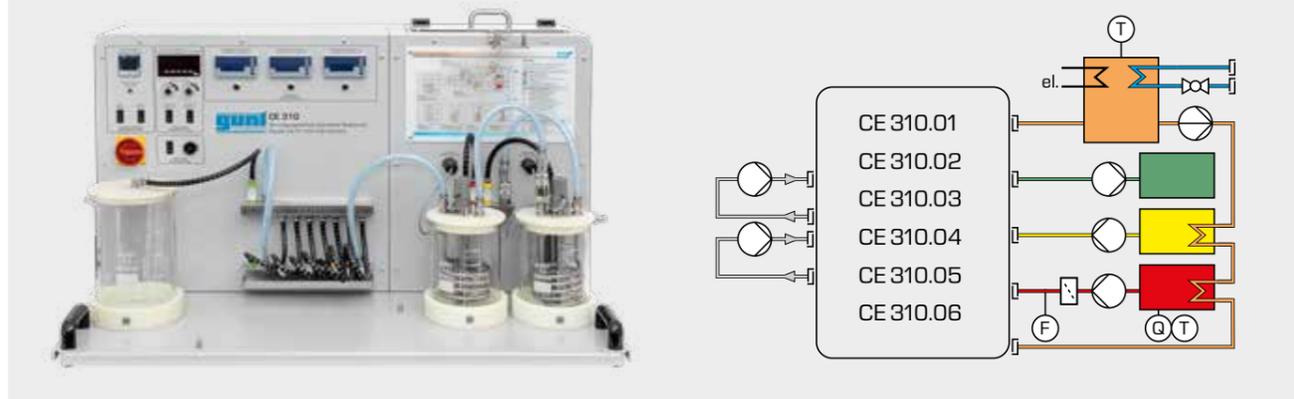
The diagram illustrates the photochemical activation process. On the left, a chemical structure shows a hydrogen atom (H) and an oxygen atom (O) with a wavy arrow labeled 'UV' indicating the absorption of light energy. This leads to the formation of a hydroxyl radical (·OH) and a hydrogen atom (H). On the right, a photograph shows a laboratory setup for fixed-bed catalysis (CE 380) and advanced oxidation (CE 584). The setup includes a control panel, a reactor vessel, and a large blue cylindrical tank.

CE 380 Festbettkatalyse

CE 584 Erweiterte Oxidation

# Übersicht CE 310 Das modulare System für die Chemische Verfahrenstechnik

## Eine Versorgungseinheit für alle Reaktortypen



Die Versorgungseinheit besitzt alle Komponenten, die für den Betrieb der verschiedenen Reaktoren benötigt werden:

- Behälter und Pumpen zur Förderung der Edukte, Zwischenprodukte und Produkte.
- Messtechnik zur Bestimmung der Produktkonzentrationen
- Wasserkreislauf zum Heizen der Reaktoren und zum Kühlen mit WL 110.20 Kaltwassererzeuger
- Bedienelemente zur Einstellung der Durchflüsse und Temperatur

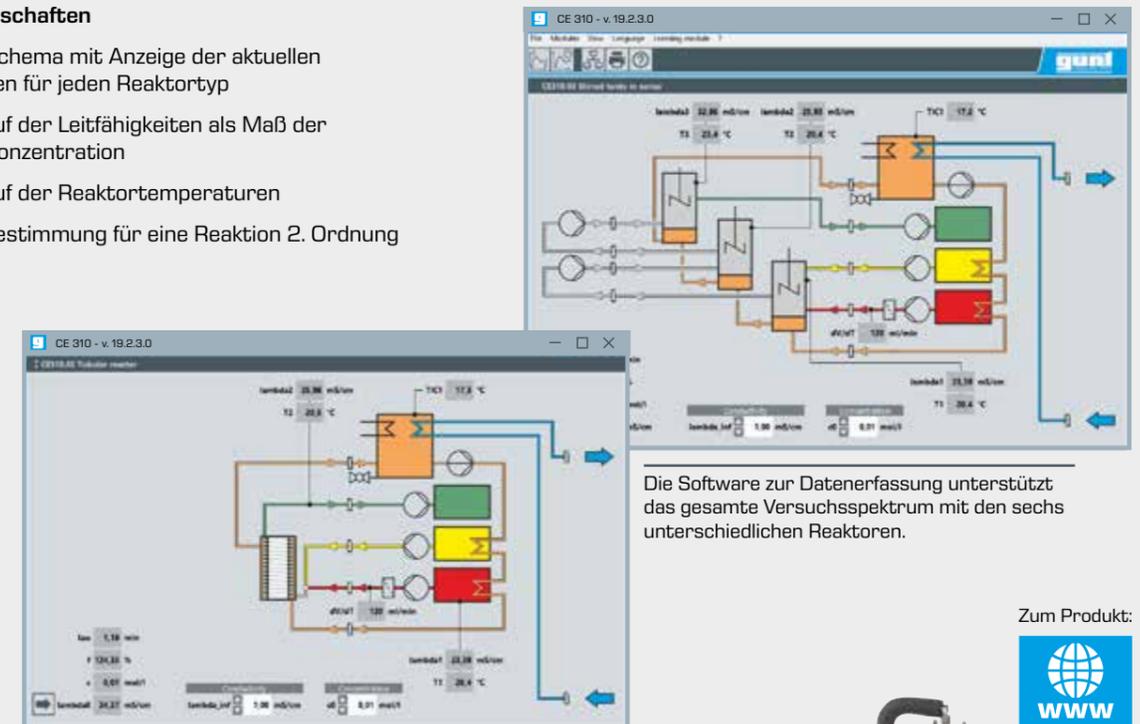
**Lerninhalte:**  
zusammen mit einem Reaktor (CE 310.01 – CE 310.06):

- Umsatzbestimmung in Abhängigkeit von
  - ▶ Reaktortyp
  - ▶ Verweilzeit im Reaktor
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration
- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
- Bestimmung der Verweilzeitverteilung
- Aufbau und Funktionsweise verschiedener Reaktortypen kennenlernen

## Software zur Datenerfassung

### Haupteigenschaften

- Prozessschema mit Anzeige der aktuellen Messdaten für jeden Reaktortyp
- Zeitverlauf der Leitfähigkeiten als Maß der Produktkonzentration
- Zeitverlauf der Reaktortemperaturen
- Umsatzbestimmung für eine Reaktion 2. Ordnung



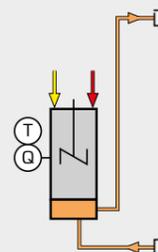
Die Software zur Datenerfassung unterstützt das gesamte Versuchsspektrum mit den sechs unterschiedlichen Reaktoren.

Zum Produkt:

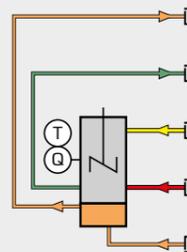
## Rührkesselreaktoren



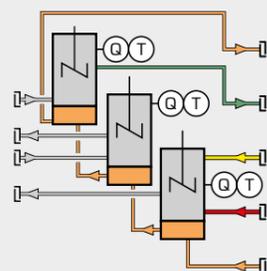
CE 310.04  
Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor



CE 310.01  
Kontinuierlicher Rührkesselreaktor



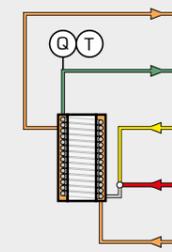
CE 310.03  
Rührkesselkaskade



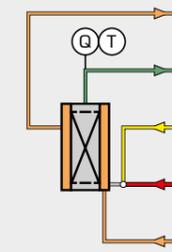
## Strömungsrohrreaktoren



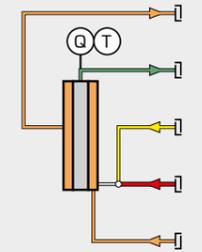
CE 310.02  
Strömungsrohrreaktor



CE 310.05  
Reaktor mit Kolbenströmung



CE 310.06  
Reaktor mit laminarer Strömung



## CE 310

### Versorgungseinheit chemische Reaktoren



#### Beschreibung

- Versorgungseinheit für verschiedene Reaktoren (CE 310.01 – CE 310.06)
- Verseifungsreaktion mit Leitfähigkeitsmessung zur Bestimmung des Umsatzes
- Vorwärmung der Edukte

Der Reaktor ist das Kernelement einer chemischen Produktionsanlage. Im Reaktor reagieren die Ausgangsstoffe (Edukte) miteinander zu einem neuen Stoff (Produkt). Der Reaktor muss die Bedingungen für den optimalen Ablauf der Reaktion gewährleisten. Hierzu zählt vor allem die Temperatur im Reaktor. Je nach Anforderungen werden unterschiedliche Arten von Reaktoren eingesetzt.

CE 310 dient als Versorgungseinheit für sechs verschiedene Reaktoren. Der zu untersuchende Reaktor wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten.

Zum kontinuierlichen Betrieb der Reaktoren befinden sich zwei Behälter für die Edukte auf dem Versuchsstand. Die hydraulische Verbindung zwischen der Versorgungseinheit und dem Reaktor erfolgt mit Schläuchen. Zur einfachen Montage sind die Schläuche mit Schnellkupplungen ausgestattet. Zwei Pumpen fördern die beiden Edukte in den Reaktor.

Über die Drehzahl der Pumpen lässt sich die Verweilzeit der Edukte im Reaktor einstellen. Im Reaktor werden die Edukte zum Produkt umgesetzt. Für das Produkt stehen eine weitere Pumpe und ein weiterer Behälter zur Verfügung.

Zur Regelung der Temperatur der Edukte und in den Reaktoren besitzt die Versorgungseinheit einen Heizwasserkreislauf mit Pumpe, Behälter und Heizer. Der Kühlbetrieb ist zusammen mit WL 110.20 Kaltwassererzeuger möglich.

Leitfähigkeit und Temperatur im Reaktor werden mit einem kombinierten Aufnehmer erfasst. Der Schaltschrank enthält die erforderlichen Bedienelemente zum Einschalten der Rührer in den verschiedenen Reaktoren.

Die Messwerte werden am Schaltschrank digital angezeigt und können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der mitgelieferten Software ausgewertet werden.

#### Lerninhalte / Übungen

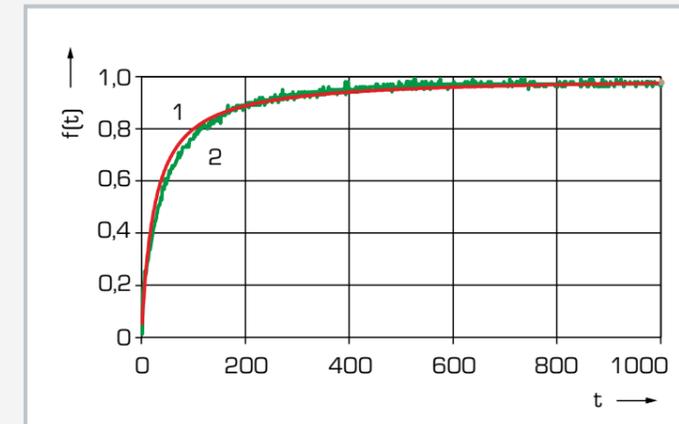
- zusammen mit einem Reaktor (CE 310.01 – CE 310.06)
  - ▶ Aufbau und Funktionsweise unterschiedlicher Reaktortypen kennenlernen
  - ▶ Umsatzbestimmung in Abhängigkeit des Reaktortyps
  - ▶ Umsatzbestimmung in Abhängigkeit der Verweilzeit im Reaktor
  - ▶ Umsatzbestimmung in Abhängigkeit der Temperatur
  - ▶ Umsatzbestimmung in Abhängigkeit der Konzentration
  - ▶ Grundlagen einer Verseifungsreaktion
  - ▶ Bestimmung der Verweilzeitverteilung

## CE 310

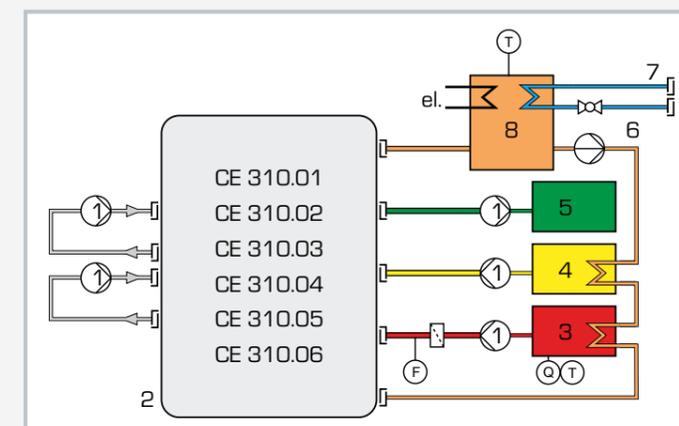
### Versorgungseinheit chemische Reaktoren



1 Anzeige- und Bedienelemente, 2 Produktbehälter, 3 Anschlussleiste, 4 und 5 Behälter für Edukte, 6 Wasserbehälter, 7 Anzeigen für Leitfähigkeit und Temperatur



zeitlicher Verlauf des Umsatzes mit diskontinuierlichem Rührkesselreaktor (CE 310.04)  
1 theoretischer Umsatz, 2 gemessener Umsatz;  $f(t)$  Umsatz,  $t$  Zeit



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Schlauchpumpe, 2 Reaktor, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; G Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

#### Spezifikation

- [1] Versorgungseinheit für 6 verschiedene chemische Reaktortypen
- [2] Anschluss der Reaktoren über Schläuche mit Schnellkupplungen
- [3] Wasserkreislauf mit Behälter, Heizer, Temperaturregler, Pumpe und Schutz gegen Wassermangel zum Heizen und Kühlen (mit WL 110.20 Kaltwassererzeuger)
- [4] Regelung der Temperatur der Edukte und Reaktoren
- [5] 3 Glasbehälter für Edukte und Produkte
- [6] 5 Schlauchpumpen zur Förderung der Edukte und Produkte
- [7] 2 kombinierte Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur
- [8] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 10

#### Technische Daten

##### Schlauchpumpe für Edukte

- max. Fördermenge: ca. 180mL/min
- mit Schlauch 8,0x4,8mm

##### Schlauchpumpe für Produkte

- max. Fördermenge: ca. 420mL/min
- mit Schlauch 8,0x4,8mm

##### Wasserpumpe

- max. Fördermenge: 10L/min
- max. Förderhöhe: 30m
- Leistungsaufnahme: 120W

##### Heizer

- Leistungsaufnahme: 1500W

##### Behälter

- Edukte: 2x 2,5L
- Produkt: 5L
- Heizwasser: 8L

##### Messbereiche

- Leitfähigkeit: 2x 0...100mS/cm
- Temperatur: 2x 0...55°C, 1x 0...60°C
- Durchfluss: 1x 0...240L/min

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1170x670x690mm  
Gewicht: ca. 82kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss / WL 110.20  
Ethylacetat, Natronlauge (für Verseifungsreaktion)  
PC mit Windows empfohlen

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 2 Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 310.01 Kontinuierlicher Rührkesselreaktor



### Beschreibung

- Rührkesselreaktor für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses
- isothermer Betrieb
- einstellbares Reaktorvolumen
- Bestimmung des Umsatzes bei einer Verseifungsreaktion

Rührkesselreaktoren können diskontinuierlich oder kontinuierlich betrieben werden. Der Einsatz diskontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren erfolgt meist bei geringen herzustellenden Produktmengen oder langsam ablaufenden Reaktionen. Kontinuierliche Rührkesselreaktoren ermöglichen die sichere Herstellung großer Produktmengen mit gleichbleibender Qualität.

CE 310.01 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310 können Funktion und Verhalten eines Rührkesselreaktors im kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb untersucht werden. Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie über alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter.

CE 310.01 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten. Schnellkupplungen

ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Im kontinuierlichen Betrieb fördern zwei Pumpen der Versorgungseinheit die Edukte in den Reaktor. Ein Rührer sorgt für eine gleichmäßige Durchmischung und erhöht somit den direkten Kontakt der Edukte. Durch Reaktion der Edukte entsteht das Produkt. Das Gemisch aus Produkt und nicht umgesetzten Edukten verlässt über einen Überlauf den Reaktor und wird in einen Behälter der Versorgungseinheit gefördert.

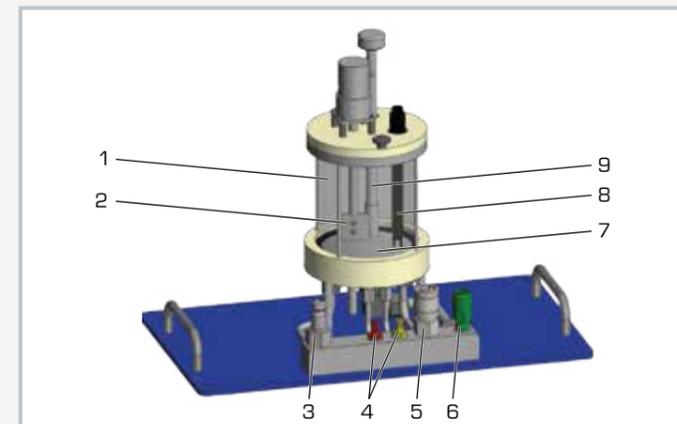
Die Höhe des Überlaufs ist variabel. Somit ist das Reaktorvolumen einstellbar. Die Verweilzeit der Edukte im Reaktor wird über die Drehzahl der Pumpen auf der Versorgungseinheit eingestellt. Der gekammerte Boden des Rührkesselreaktors dient als Wärmeübertrager, um den Einfluss der Temperatur auf die Reaktion zu untersuchen.

Der Umsatz im Rührkesselreaktor wird durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist in CE 310 enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

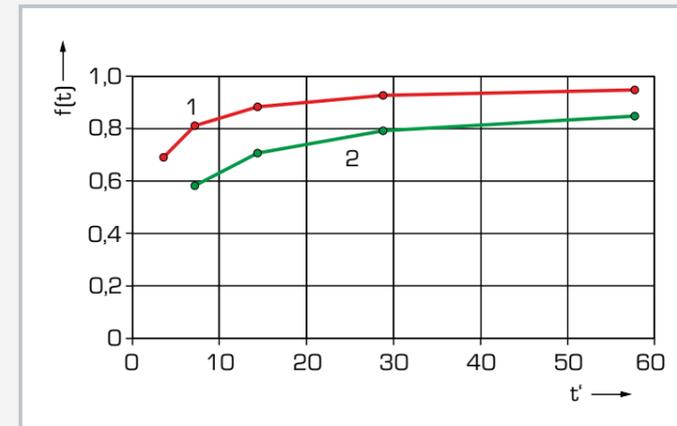
### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
- Umsatz in Anhängigkeit von
  - ▶ Verweilzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration

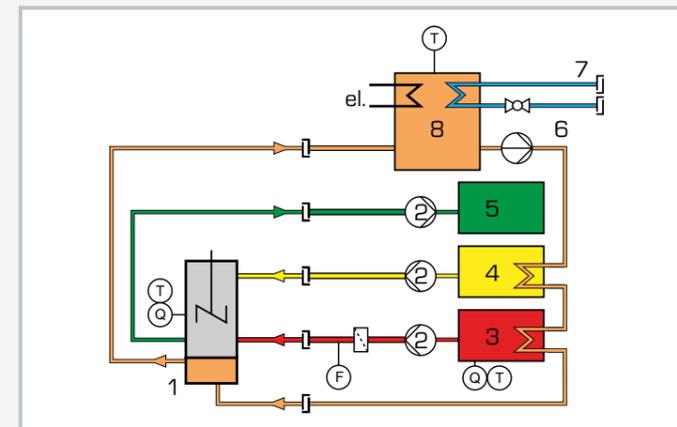
## CE 310.01 Kontinuierlicher Rührkesselreaktor



1 Rührkesselreaktor, 2 Rührer, 3 Zulauf Wasser, 4 Zulauf Edukte A/B, 5 Ablauf Wasser, 6 Ablauf Produkt, 7 gekammerter Boden als Wärmeübertrager, 8 Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur (enthalten in CE 310), 9 höhenverstellbarer Überlauf



Umsätze für verschiedene Verweilzeiten und Temperaturen  
1 hohe Temperatur, 2 niedrige Temperatur;  $f(t)$  Umsatz,  $t'$  Verweilzeit



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Rührkesselreaktor, 2 Schlauchpumpe, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter, Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

### Spezifikation

- [1] kontinuierlicher Rührkesselreaktor zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] Behälter aus Glas
- [3] höhenverstellbarer Überlauf zur Veränderung des Reaktorvolumens
- [4] Reaktor mit Rührwerk
- [5] gekammerter Boden aus Edelstahl als Wärmeübertrager zum Anschluss an CE 310
- [6] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [7] Regelung der Temperatur im Reaktor über CE 310

### Technische Daten

Rührkesselreaktor

- Außendurchmesser: 110mm
- Innendurchmesser: 100mm
- Höhe: 120mm
- einstellbares Volumen: 270...750mL

Drehzahl Rührer

- ca. 330min<sup>-1</sup>

LxBxH: 440x250x320mm

Gewicht: ca. 10kg

### Lieferumfang

- 1 kontinuierlicher Rührkesselreaktor

## CE 310.02 Strömungsrohrreaktor



### Beschreibung

- Strömungsrohrreaktor für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses
- Bestimmung des Umsatzes einer Verseifungsreaktion

Strömungsrohrreaktoren gehören zu den kontinuierlich betriebenen Reaktoren. Strömungsrohrreaktoren ermöglichen die kostengünstige Herstellung großer Produktmengen mit gleichbleibender Qualität.

CE 310.02 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310 können Funktion und Verhalten eines Strömungsrohrreaktors untersucht werden. Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter.

CE 310.02 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten. Schnellkupplungen ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Die zwei Pumpen der Versorgungseinheit fördern die Edukte getrennt durch jeweils eine Düse in den Reaktor.

Die Düsenaustritte befinden sich in einem T-Stück und sind so angeordnet, dass sich die beiden Edukte in der Mitte des T-Stückes vermischen. Die Mischung tritt in das spiralförmig aufgewickelte Strömungsrohr ein, in welchem die beiden Edukte reagieren. Das Gemisch aus Produkt und nicht umgesetzten Edukten verlässt das Strömungsrohr und wird in einen Behälter der Versorgungseinheit gefördert.

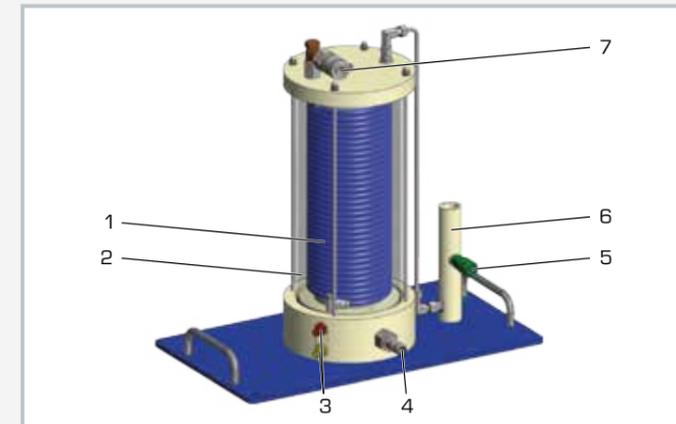
Die Verweilzeit der Edukte im Strömungsrohrreaktor wird über die Drehzahl der Pumpen auf der Versorgungseinheit eingestellt. Das Strömungsrohr befindet sich ebenfalls im Wasserbad. Über Schnellkupplungen ist das Wasserbad mit dem Heizwasserkreislauf der Versorgungseinheit verbunden und ermöglicht so die Untersuchung des Einflusses der Temperatur auf die Reaktion.

Der Umsatz im Strömungsrohrreaktor wird durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist in CE 310 enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

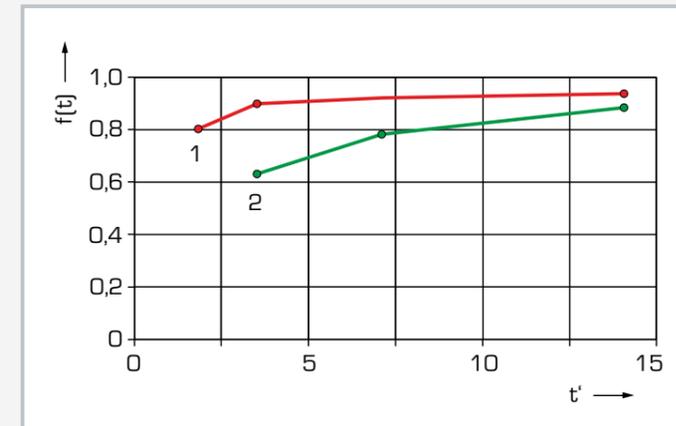
### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
- Umsatz in Abhängigkeit von
  - ▶ Verweilzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration

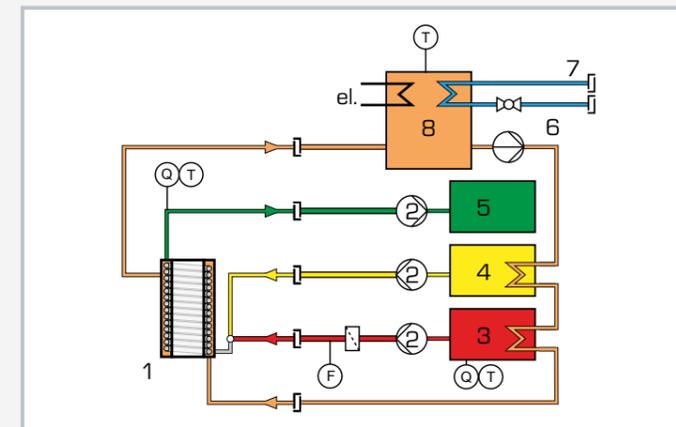
## CE 310.02 Strömungsrohrreaktor



1 Strömungsrohrreaktor, 2 Doppelmantel, 3 Zulauf Edukt A/B, 4 Zulauf Wasser, 5 Ablauf Produkt, 6 Hülse für Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur (enthalten in CE 310), 7 Ablauf Wasser



Umsätze für verschiedene Verweilzeiten und Temperaturen  
1 hohe Temperatur, 2 niedrige Temperatur;  $f(t)$  Umsatz,  $t'$  Verweilzeit



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Strömungsrohrreaktor, 2 Schlauchpumpe, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

### Spezifikation

- [1] Strömungsrohrreaktor zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] spiralförmig aufgewickeltes Strömungsrohr aus Kunststoff als Reaktor
- [3] T-Stück mit 2 Düsen zur Mischung der vorgewärmten Edukte
- [4] transparenter Behälter aus PMMA als Wasserbad für den Reaktor und zum Anschluss an den Heizwasserkreislauf von CE 310
- [5] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [6] Regelung der Temperatur im Reaktor über CE 310

### Technische Daten

Strömungsrohrreaktor

- Innendurchmesser: 6mm
- Reaktorvolumen: ca. 280mL
- Material: PA

Wasserbad

- Innendurchmesser: 132mm
- Aussendurchmesser: 140mm
- Volumen: 2L
- Material: PMMA

LxBxH: 440x250x430mm

Gewicht: ca. 11,5kg

### Lieferumfang

- 1 Strömungsrohrreaktor

## CE 310.03 Rührkesselkaskade



### Beschreibung

- Rührkesselkaskade für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses
- Bestimmung des Umsatzes bei einer Verseifungsreaktion für jede Stufe möglich
- isothermer Betrieb

Rührkesselkaskaden sind eine Reihenschaltung kontinuierlicher Rührkesselreaktoren. Verglichen mit einem einzelnen Rührkesselreaktor sind mit einer Rührkesselkaskade höhere Umsätze möglich. Rührkesselkaskaden ermöglichen eine flexible Prozessführung, da in den einzelnen Reaktoren die separate Einstellung unterschiedlicher Temperaturen und Verweilzeiten möglich ist.

CE 310.03 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310, können Funktion und Verhalten einer Rührkesselkaskade untersucht werden. Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie über alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter.

CE 310.03 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten.

Schnellkupplungen ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Im kontinuierlichen, dreistufigen Betrieb fördern zwei Pumpen der Versorgungseinheit die Edukte in den ersten Reaktor. Ein Rührer sorgt für eine gleichmäßige Durchmischung und erhöht somit den direkten Kontakt der Edukte. Durch Reaktion der Edukte entsteht das Produkt. Das Gemisch aus Produkt und nicht umgesetzten Edukten verlässt über einen Überlauf den Reaktor und wird nacheinander in zwei weitere identische Reaktoren gefördert. Die Zwischenförderung erfolgt mit zwei weiteren Schlauchpumpen der Versorgungseinheit. Im Anschluss des dritten Reaktors erfolgt die Förderung in einen Behälter der Versorgungseinheit.

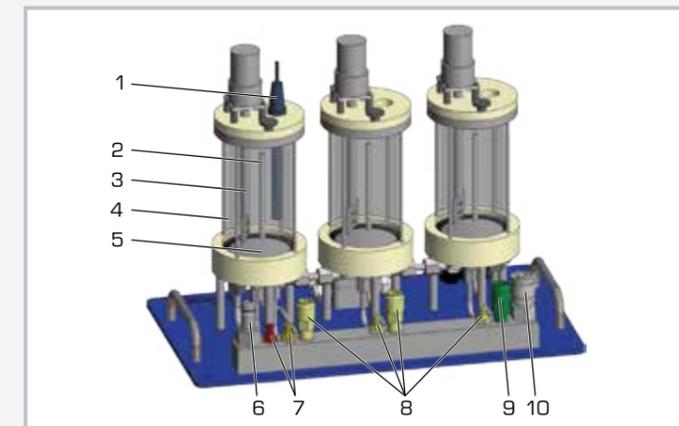
Die Verweilzeiten in den Reaktoren werden über die Drehzahl der Pumpen auf der Versorgungseinheit eingestellt.

Die Umsätze in den einzelnen Reaktoren werden durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist im Lieferumfang enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

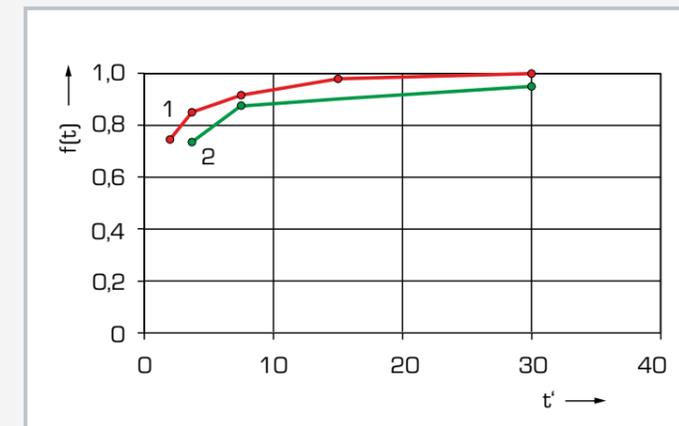
### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
- Umsatzbestimmung in jedem Reaktor in Abhängigkeit von
  - ▶ Verweilzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration

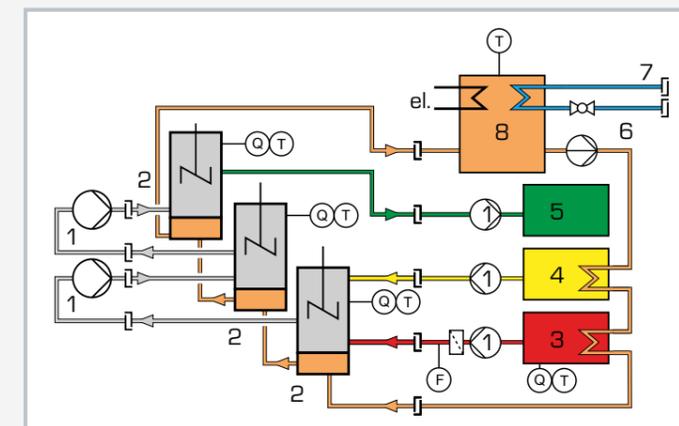
## CE 310.03 Rührkesselkaskade



1 Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur, 2 Überlauf, 3 Rührer, 4 Rührkesselreaktor, 5 gekammerter Boden als Wärmeübertrager, 6 Zulauf Wasser, 7 Zulauf Edukt A/B, 8 Zwischenförderung, 9 Ablauf Produkt, 10 Ablauf Wasser



Gesamtumsätze für verschiedene Verweilzeiten und Temperaturen  
1 hohe Temperatur, 2 niedrige Temperatur;  $f(t)$  Umsatz,  $t'$  Verweilzeit je Reaktor



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Schlauchpumpe, 2 Rührkessel, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

### Spezifikation

- [1] Rührkesselkaskade zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] 3 identische Rührkesselreaktoren aus Glas in Reihe geschaltet
- [3] gekammerter Boden aus Edelstahl als Wärmeübertrager zum Anschluss an CE 310
- [4] Förderung zwischen den Rührkesseln mit 2 Schlauchpumpen der Versorgungseinheit
- [5] kleine Reaktorvolumina für geringen Chemikalienbedarf
- [6] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur
- [7] Anzeige von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [8] Regelung der Temperatur in den Reaktoren über CE 310

### Technische Daten

- 3 Reaktoren
- Außendurchmesser: je 80mm
  - Innendurchmesser: je 70mm
  - Höhe: je 140mm
  - Reaktionsvolumen: je ca. 350mL

- Drehzahl Rührer
- 3x ca. 330min<sup>-1</sup>

- Messbereiche
- Leitfähigkeit: 0...100mS/cm
  - Temperatur: 0...60°C

- LxBxH: 440x250x350mm  
Gewicht: ca. 14kg

### Lieferumfang

- 1 Rührkesselkaskade
- 1 Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur

## CE 310.04

### Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor



#### Beschreibung

- diskontinuierlicher Rührkesselreaktor für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses
- isothermer Betrieb möglich
- Bestimmung des Umsatzes bei einer Verseifungsreaktion

Der Einsatz diskontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren erfolgt meist bei geringen herzustellenden Produktmengen oder langsam ablaufenden Reaktionen.

CE 310.04 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310 können Funktion und Verhalten eines diskontinuierlichen Rührkesselreaktors untersucht werden. Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie über alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter.

CE 310.04 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten. Schnellkupplungen ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Die Edukte werden zu Beginn in der Versorgungseinheit vorgewärmt. Danach erfolgt die Zugabe der Edukte in den Rührkesselreaktor. Ein Rührer sorgt für eine gleichmäßige Durchmischung und erhöht somit den direkten Kontakt der Edukte. Durch Reaktion der Edukte entsteht das Produkt.

Im isothermen Betrieb dient der gekammerte Boden des Rührkesselreaktors als Wärmeübertrager, um durch Heizen oder Kühlen die Temperatur im Reaktor konstant zu halten.

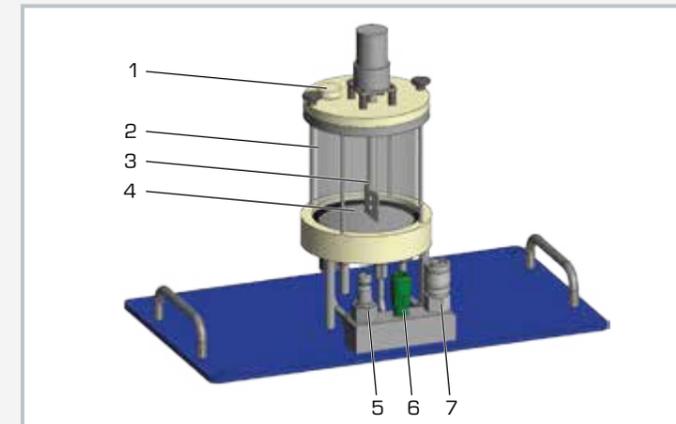
Der Umsatz im diskontinuierlichen Rührkesselreaktor wird durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist in CE 310 enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

#### Lerninhalte / Übungen

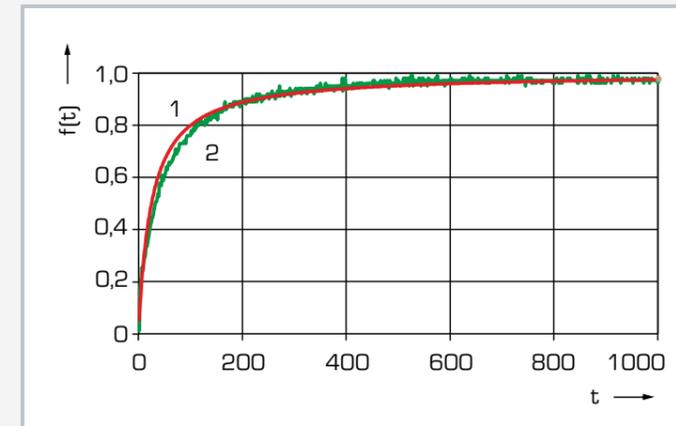
- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
  - ▶ Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten
  - ▶ Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten
- Umsatzbestimmung in Abhängigkeit von
  - ▶ Reaktionszeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration

## CE 310.04

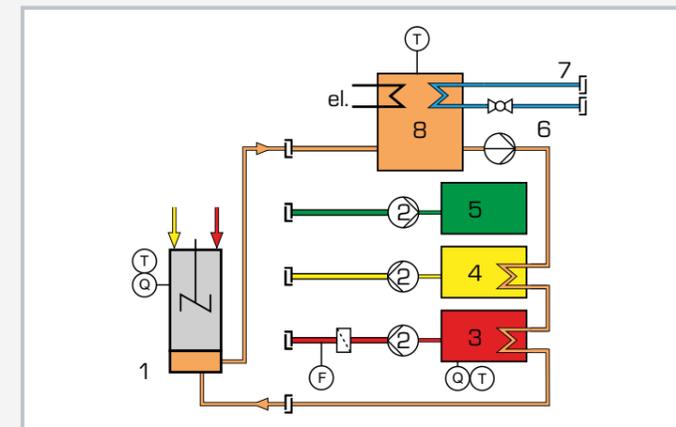
### Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor



1 Bohrung für Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur (enthalten in CE 310), 2 Rührkesselreaktor, 3 Rührer, 4 gekammerter Boden als Wärmeübertrager, 5 Zulauf Wasser, 6 Ablauf Produkt, 7 Ablauf Wasser



zeitlicher Verlauf des Umsatzes  
1 theoretischer Umsatz, 2 gemessener Umsatz;  $f(t)$  Umsatz,  $t$  Zeit



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Rührkesselreaktor, 2 Schlauchpumpe, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

#### Spezifikation

- [1] diskontinuierlicher Rührkesselreaktor zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] Rührer zur Durchmischung
- [3] gekammerter Boden aus Edelstahl als Wärmeübertrager zum Anschluss an CE 310
- [4] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [5] Regelung der Temperatur in den Reaktoren über CE 310

#### Technische Daten

- Reaktor
- Außendurchmesser: 110mm
  - Innendurchmesser: 100mm
  - Höhe: 140mm
  - Volumen: ca. 750mL

Drehzahl Rührer: ca. 330min<sup>-1</sup>

LxBxH: 440x250x320mm  
Gewicht: ca. 10kg

#### Lieferumfang

- 1 diskontinuierlicher Rührkesselreaktor
- 2 Bechergläser
- 1 Trichter

## CE 310.05

### Reaktor mit Kolbenströmung

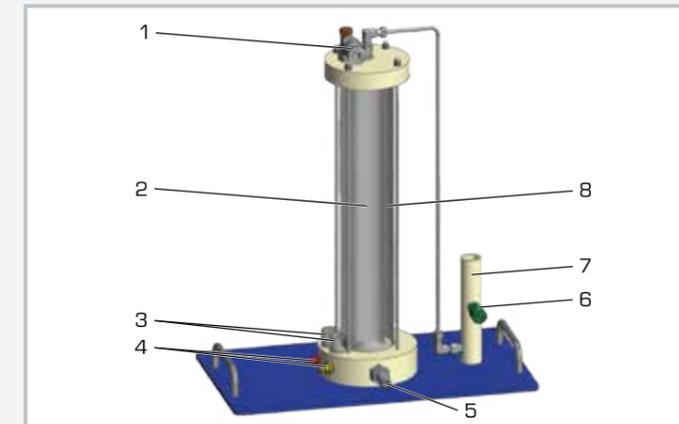


#### Lerninhalte / Übungen

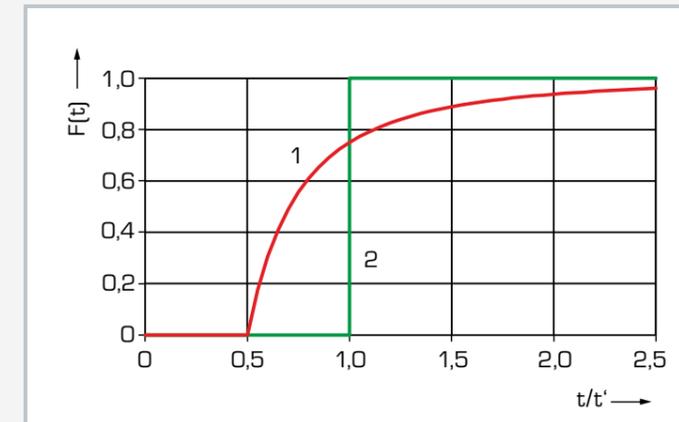
- Grundlagen der Verseifungsreaktion
- kontinuierlicher Betrieb
- Umsatzbestimmung in Abhängigkeit von
  - ▶ Verweilzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration
- Verweilzeitverteilung

## CE 310.05

### Reaktor mit Kolbenströmung



1 Ablauf Wasser, 2 Reaktor mit Festbett, 3 Windkessel, 4 Zulauf Edukte A/B, 5 Zulauf Wasser, 6 Ablauf Produkt, 7 Hülse für Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur (enthalten in CE 310), 8 Doppelmantel für Wasser



1 laminare Strömung, 2 Kolbenströmung;  $F(t)$  Verweilzeitsummenkurve,  $t$  Zeit,  $t'$  Verweilzeit

#### Spezifikation

- [1] Reaktor mit Kolbenströmung zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] Windkessel zur Reduktion von Pulsationen
- [3] T-Stück mit Düse zur Mischung der Edukte
- [4] gerades Glasrohr mit Festbett aus Glaskugeln als Reaktor
- [5] transparenter Doppelmantel aus PMMA zum Kühlen und Heizen mit CE 310 und WL 110.20
- [6] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [7] Regelung der Temperatur über CE 310

#### Technische Daten

Reaktor mit Kolbenströmung

- Innendurchmesser: 40mm
- Höhe: 400mm
- Material: Glas

Wasserbad

- Innendurchmesser: 70mm
- Volumen: ca. 0,4L
- Material: PMMA

LxBxH: 440x250x530mm  
Gewicht: ca. 15kg

#### Lieferumfang

- 1 Reaktor mit Kolbenströmung

#### Beschreibung

- Reaktor mit Kolbenströmung für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- kontinuierlicher Betrieb
- Festbett aus Glaskugeln
- transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses
- isothermer Betrieb
- Bestimmung des Umsatzes bei einer Verseifungsreaktion

Reaktoren mit Kolbenströmung sind Rohrströmungsreaktoren und werden kontinuierlich betrieben. Sie ermöglichen die Untersuchung von chemischen Reaktionen bei definierten Bedingungen.

CE 310.05 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310 können Funktion und Verhalten eines Reaktors mit Kolbenströmung im kontinuierlichen Betrieb untersucht werden.

Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie über alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter. In Kombination mit WL 110.20 Kaltwassererzeuger und CE 310 Versorgungseinheit ist auch die Kühlung der Reaktoren möglich.

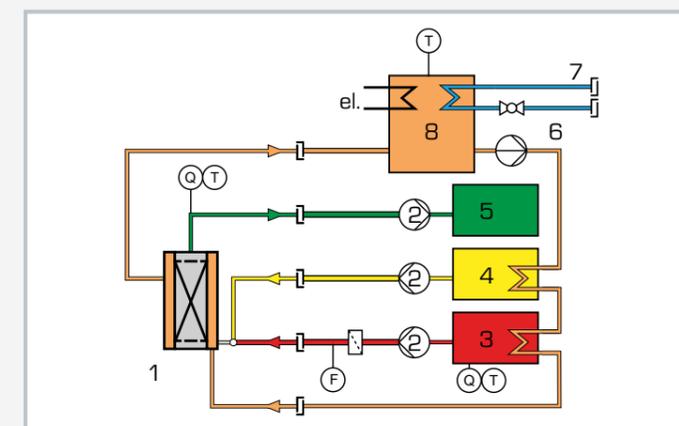
CE 310.05 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten. Schnellkupplungen ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Im kontinuierlichen Betrieb fördern zwei Pumpen der Versorgungseinheit die Edukte in den Reaktor. Das Festbett aus Glaskugeln führt zu einer Strömung über den ganzen Querschnitt des Reaktors. Durch die Reaktion der Edukte entsteht das Produkt.

Das Gemisch aus Produkt und nicht umgesetzten Edukten verlässt den Reaktor am oberen Ende. Das Gemisch wird mit einer weiteren Schlauchpumpe in einen Behälter der Versorgungseinheit gefördert.

Die Verweilzeit der Edukte im Reaktor wird über die Drehzahl der Pumpen auf der Versorgungseinheit eingestellt.

Der Umsatz im Reaktor mit Kolbenströmung wird durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist in CE 310 enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310

1 Reaktor mit Kolbenströmung, 2 Schlauchpumpe, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

## CE 310.06

### Reaktor mit laminarer Strömung



#### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen der Verseifungsreaktion
- kontinuierlicher Betrieb
- Umsatzbestimmung in Abhängigkeit von
  - ▶ Verweilzeit
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Konzentration
- Verweilzeitverteilung



#### Beschreibung

- **Reaktor mit laminarer Strömung für den Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310**
- **kontinuierlicher Betrieb**
- **transparente Materialien zur Beobachtung des Prozesses**
- **isothermer Betrieb**
- **Bestimmung des Umsatzes bei einer Verseifungsreaktion**

Reaktoren mit laminarer Strömung sind Rohrströmungsreaktoren und werden kontinuierlich betrieben. Sie ermöglichen die Untersuchung von chemischen Reaktionen bei definierten Strömungsbedingungen und der charakteristischen Verweilzeitverteilung.

CE 310.06 gehört zu einer Geräteserie, die Versuche an verschiedenen Reaktortypen ermöglicht. Zusammen mit der Versorgungseinheit CE 310 können Funktion und Verhalten eines Reaktors mit laminarer Strömung im kontinuierlichen Betrieb untersucht werden.

Die Versorgungseinheit CE 310 verfügt über einen Heizwasserkreislauf sowie über alle notwendigen Anschlüsse, Pumpen, Behälter für Edukte und einen Produktbehälter. In Kombination mit WL 110.20 Kaltwassererzeuger und CE 310 Versorgungseinheit ist auch die Kühlung des Reaktors möglich.

CE 310.06 wird auf die Versorgungseinheit aufgesetzt und durch zwei Stifte in Position gehalten. Schnellkupplungen ermöglichen die einfache Verbindung des Reaktors mit der Versorgungseinheit.

Im kontinuierlichen Betrieb fördern zwei Pumpen der Versorgungseinheit die Edukte in den Reaktor. Es bildet sich aufgrund der Abmessungen und möglichen Volumenströme eine laminare Strömung aus. Durch die Reaktion der Edukte entsteht das Produkt. Das Gemisch aus Produkt und nicht umgesetzten Edukten verlässt nach der spezifischen Verweilzeit den Reaktor am oberen Ende.

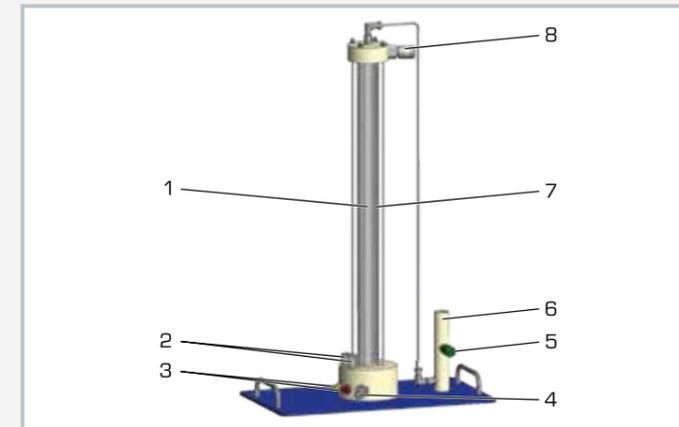
Das Gemisch wird mit einer weiteren Schlauchpumpe in einen Behälter der Versorgungseinheit gefördert.

Die Verweilzeit der Edukte im Reaktor wird über die Drehzahl der Pumpen auf der Versorgungseinheit eingestellt.

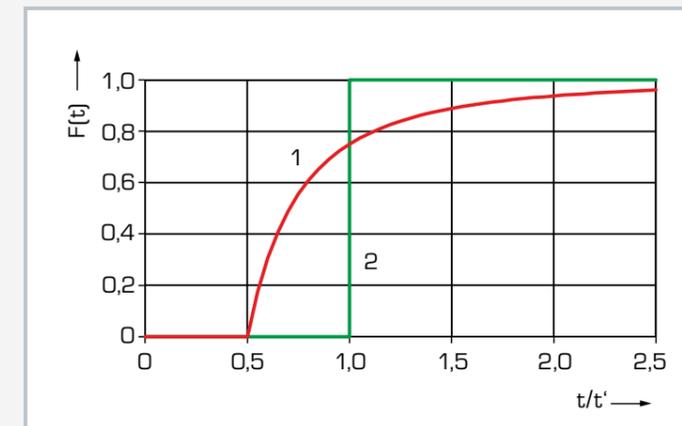
Der Umsatz des Reaktors mit laminarer Strömung wird durch Messung der Leitfähigkeit bestimmt. Ein kombinierter Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur ist in CE 310 enthalten. Die Werte werden am Schaltschrank der Versorgungseinheit digital angezeigt. Zusätzlich können die Messwerte mit Hilfe einer Software zur Datenerfassung, die in CE 310 enthalten ist, aufgenommen und weiterverarbeitet werden.

## CE 310.06

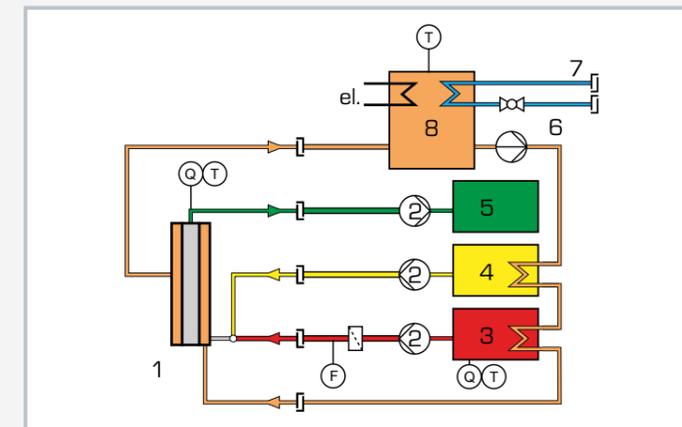
### Reaktor mit laminarer Strömung



1 Reaktor mit Festbett, 2 Windkessel, 3 Zulauf Edukte A/B, 4 Zulauf Wasser, 5 Ablauf Produkt, 6 Hülse für Aufnehmer für Leitfähigkeit und Temperatur (enthalten in CE 310), 7 Doppelmantel für Wasser, 8 Ablauf Wasser



1 laminare Strömung, 2 Kolbenströmung;  
F(t) Verweilzeitsummenkurve, t Zeit, t' Verweilzeit



Prozessschema mit Versorgungseinheit CE 310  
1 Reaktor mit laminarer Strömung, 2 Schlauchpumpe, 3 Behälter Edukt A, 4 Behälter Edukt B, 5 Behälter Produkt, 6 Wasserpumpe, 7 Wasseranschluss, 8 Wasserbehälter; Q Leitfähigkeit, F Durchfluss, T Temperatur

#### Spezifikation

- [1] Reaktor mit laminarer Strömung zum Anschluss an die Versorgungseinheit CE 310
- [2] Windkessel zur Reduktion von Pulsationen
- [3] T-Stück mit Düse zur Mischung der Edukte
- [4] besonderer Einlauf zur Reduktion der Einlauflänge
- [5] gerades Glasrohr mit laminarer Strömung
- [6] transparenter Doppelmantel aus PMMA zum Kühlen und Heizen mit CE 310 und WL 110.20
- [7] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur über CE 310
- [8] Regelung der Temperatur über CE 310

#### Technische Daten

Reaktor mit laminarer Strömung

- Innendurchmesser: 15mm
- Höhe: 600mm
- Material: Glas

Wasserbad

- Innendurchmesser: 45mm
- Volumen: ca. 0,45L
- Material: PMMA

LxBxH: 440x250x750mm  
Gewicht: ca. 10kg

#### Lieferumfang

- 1 Reaktor mit laminarer Strömung

## CE 100 Strömungsrohrreaktor



### Beschreibung

- Strömungsrohrreaktor mit Temperaturregelung
- Verseifungsreaktion mit Leitfähigkeitsmessung zur Bestimmung des Umsatzes
- Vorwärmung der Edukte

Strömungsrohrreaktoren gehören zu den kontinuierlich betriebenen Reaktoren. Strömungsrohrreaktoren ermöglichen die kostengünstige Herstellung großer Produktmengen mit gleichbleibender Qualität.

Die Hauptkomponente von CE 100 ist der Strömungsrohrreaktor mit zehn temperierten Abschnitten. Zwei Pumpen fördern die Edukte aus den Vorlagebehältern in die Vorwärmstrecken und anschließend in den Reaktor. Die Vorwärmstrecken bestehen aus einer Rohrschlinge, die sich in dem Warmwasserbehälter befindet. Nach der Vorwärmung werden die Edukte kurz vor dem Eintritt in den Reaktor vermischt. Die elektrische Leitfähigkeit des Reaktionsgemisches wird am Eintritt, in der Mitte und am Austritt des Reaktors gemessen. Während das Reaktionsgemisch den Reaktor durchströmt, reagieren die Edukte zu den Produkten. Das Gemisch aus Produkten und nicht umgesetzten Edukten tritt aus dem Reaktor aus und wird in einem Behälter gesammelt.

Die Volumenströme der Edukte und somit auch die Verweilzeit im Strömungsrohrreaktor werden an den Pumpen eingestellt. Die zehn Abschnitte des Strömungsrohrreaktors bestehen aus Doppelrohr-Wärmeübertragern. Im inneren Rohr des Wärmeübertragers fließt das Reaktionsgemisch und im Mantelrohr das warme Wasser. Dieser Warmwasserkreislauf ist temperaturgeregelt. Der Regler am Schaltschrank ermöglicht die Vorgabe der gewünschten Temperatur und zeigt die aktuelle Temperatur im Warmwasserbehälter an. Drei Rührwerke sorgen für eine gleichmäßige Durchmischung und Temperaturverteilung in den Eduktbehältern und im Warmwasserbehälter.

Aufnehmer erfassen die Temperaturen und die elektrischen Leitfähigkeiten. Die Messwerte werden an digitalen Anzeigen abgelesen und können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der Software ausgewertet werden. Die Auswertung der Reaktion erfolgt mit den gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten und dem hieraus berechneten Umsatz.

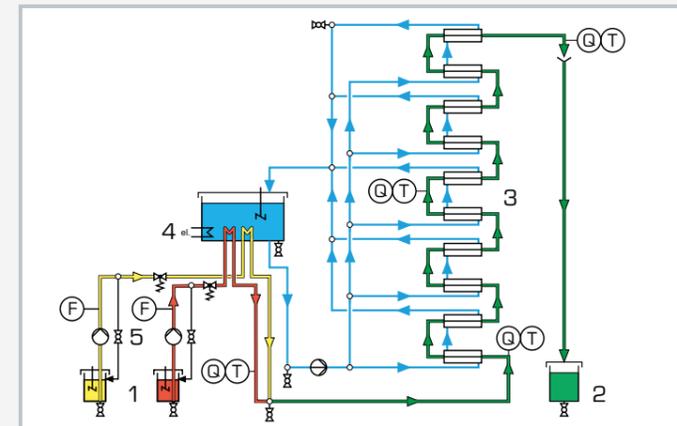
### Lerninhalte / Übungen

- Grundlagen einer Verseifungsreaktion
- Umsatz
  - ▶ in Abhängigkeit der Verweilzeit
  - ▶ in Abhängigkeit der Temperatur
  - ▶ in Abhängigkeit der Reaktionsordnung

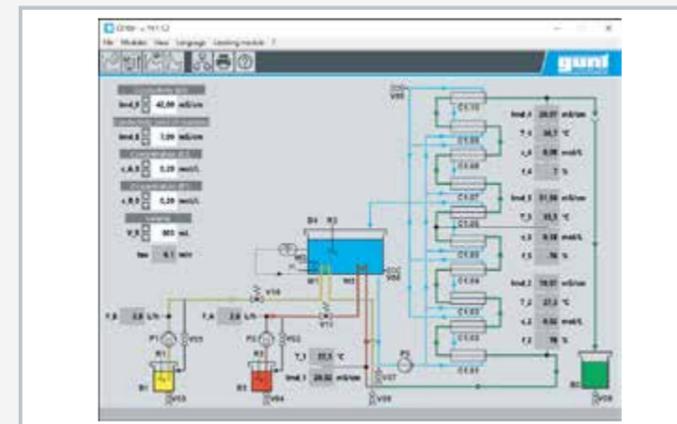
## CE 100 Strömungsrohrreaktor



1 Schaltschrank, 2 Eduktpumpen mit Volumenstrommessung, 3 Eduktbehälter, 4 Warmwasserbehälter, 5 Pumpe, 6 Produktbehälter, 7 Messung von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit, 8 Strömungsrohrreaktor mit 10 Abschnitten



1 Eduktbehälter, 2 Produktbehälter, 3 Strömungsrohrreaktor mit 10 Abschnitten, 4 Heizer, 5 Eduktpumpen, F Durchfluss, Q elektrische Leitfähigkeit, T Temperatur



Screenshot der Software

### Spezifikation

- [1] kontinuierlicher Strömungsrohrreaktor zur Durchführung einer Verseifungsreaktion
- [2] 10 Doppelrohr-Wärmeübertrager als Reaktor
- [3] 2 baugleiche Pumpen zur Förderung der Edukte
- [4] Einstellung der Volumenströme der Edukte an den Pumpen
- [5] Vorwärmung der Edukte mit 2 Rohrschlangen aus Edelstahl
- [6] T-Stück zur Mischung der vorgewärmten Edukte
- [7] Warmwasserbehälter mit Temperaturregelung
- [8] Messungen für die elektrische Leitfähigkeit: am Eintritt, in der Mitte und am Austritt des Reaktors
- [9] Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur mit 3 kombinierten Aufnehmern
- [10] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10

### Technische Daten

Strömungsrohrreaktor

- Ø innen: ca. 8mm
- Reaktorvolumen: ca. 0,6L
- Material: 1.4571

Eduktpumpen

- max. Fördermenge: 0,3L/min
- max. Förderhöhe: 20m

Behälter

- Edukte: 2x 25L
- Produkte: 1x 50L
- Wasser: 1x 30L

Warmwasserkreislauf

- Leistung Heizer: ca. 4kW
- Temperatur: max. 55°C

Drehzahl Rührwerke: max. 310min<sup>-1</sup>

Messbereiche

- Volumenstrom: 2x 2...320mL/min
- Temperatur: 4x 0...80°C
- Leitfähigkeit: 3x 0...100mS/cm

400V, 50Hz, 3 Phasen

400V, 60Hz, 3 Phasen, 230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 1900x790x1950mm

Gewicht: ca. 290kg

### Für den Betrieb erforderlich

Ethylacetat, Natronlauge (für Verseifungsreaktion)  
PC mit Windows empfohlen

### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

Besuchen Sie  
unsere Website

Auf unserer Website finden Sie alle Informationen  
rund um unser Programm.

## Basiswissen

# Katalytische Aktivierung

Viele Reaktionen laufen bei Umgebungstemperatur für eine technische Nutzung zu langsam ab, weil ihre Aktivierungsenergien sehr hoch sind. Katalysatoren senken die Aktivierungsenergie und beschleunigen die chemische Reaktion.

Somit wird die Nutzung einiger Reaktionen überhaupt erst ermöglicht und der Energieaufwand bei der Produktion gesenkt.

Nach Wilhelm Ostwald ist ein Katalysator jeder Stoff, der, ohne im Endprodukt einer chemischen Reaktion zu erscheinen, ihre Geschwindigkeit ändert. Unter Katalyse kann dann die Beschleunigung einer chemischen Reaktion unter Wirkung eines Katalysators verstanden werden. An schätzungsweise mehr als 80% aller industriellen chemischen Prozesse sind Katalysatoren beteiligt.

Für den einfachen Fall der Reaktion eines Eduktes **A** in ein Produkt **P** unter Mitwirkung eines Katalysators **K** kann man sich vorstellen, dass die Katalyse über ein Zwischenprodukt **X** verläuft. Das Edukt und der Katalysator bilden also zunächst ein Zwischenprodukt. Aus dem Zwischenprodukt entsteht dann das Produkt **P** unter Freisetzung des Katalysators. Der Katalysator ist nach der Reaktion unverändert und steht wieder für weitere Reaktionen zur Verfügung.

Eine mögliche Erklärung der Katalyse ist die Theorie des Übergangszustandes. Diese Theorie geht davon aus, dass die an der Reaktion beteiligten Edukte eine Energieschwelle überwinden müssen, damit es zu einer Reaktion kommt. Den Molekülzustand am Maximum der Energieschwelle  $E_1$  bezeichnet man als aktivierten Komplex. Aus diesem Molekülzustand entstehen dann direkt die Produkte. Bei der Katalyse wird der aktivierte Komplex aus den Edukten und dem Katalysator gebildet. Die Energie  $E_2$ , die zur Bildung des Komplexes mit Katalysator benötigt wird, ist geringer als die Energie  $E_1$ , die ohne Katalysator benötigt wird.

Dieser geringere Energieaufwand hat zur Folge, dass pro Zeiteinheit eine größere Anzahl von Edukten zu Produkten reagiert. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist also größer.

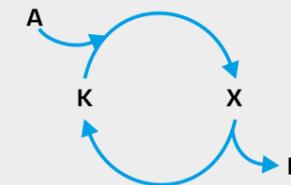
Man unterscheidet zwei Arten der Katalyse:

### ■ Homogene Katalyse

Der Katalysator und die Ausgangsstoffe der chemischen Reaktion liegen in der gleichen Phase vor. Sie findet also in der flüssigen oder gasförmigen Phase statt. In der flüssigen Phase beeinflussen neben der Art der Edukte und des Katalysators auch Eigenschaften des Lösungsmittels (z.B. Viskosität) die Reaktionsgeschwindigkeit.

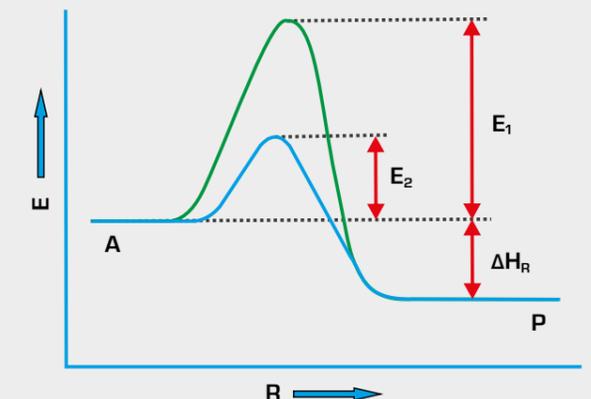
### ■ Heterogene Katalyse

Der Katalysator liegt meist in fester Form vor. Die Ausgangsstoffe der Reaktion liegen in flüssiger oder gasförmiger Form vor. Neben der eigentlichen chemischen Reaktion zwischen Edukten und Katalysator spielen Prozesse wie die Diffusion im Inneren des festen Katalysators und Sorptionsprozesse eine große Rolle für die Reaktionsgeschwindigkeit.



Reaktionsschema einer einfachen katalytischen Reaktion als Schema (oben) und Zyklus (unten):

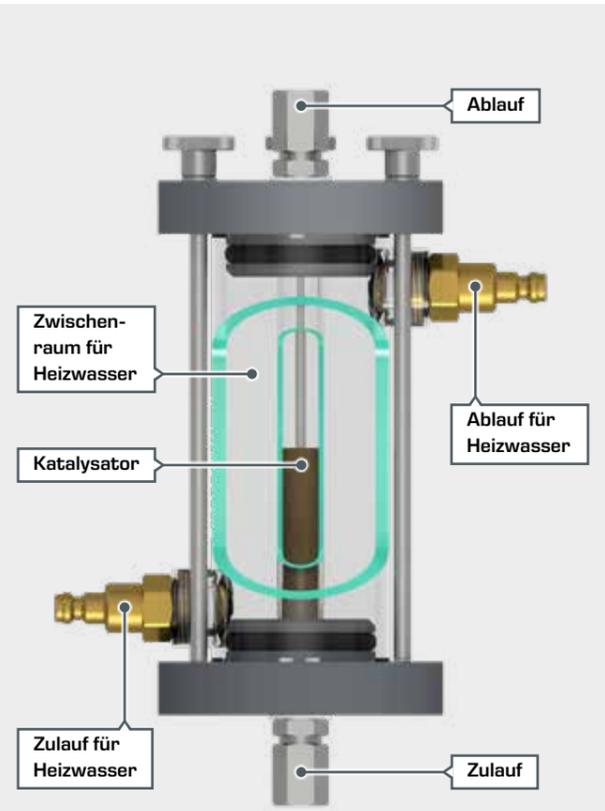
**A** Edukt, **K** Katalysator, **X** Zwischenprodukt, **P** Produkt



Energieänderung mit und ohne Katalysator (exotherm):

**E** Energie, **R** Reaktionskoordinate,  $E_1$  notwendige Energie zur Bildung eines aktivierten Komplexes ohne Katalysator,  $E_2$  notwendige Energie zur Bildung eines aktivierten Komplexes mit Katalysator,  $\Delta H_R$  Reaktionsenthalpie

## Übersicht CE 380 Festbettkatalyse



Aufbau der Festbettreaktoren

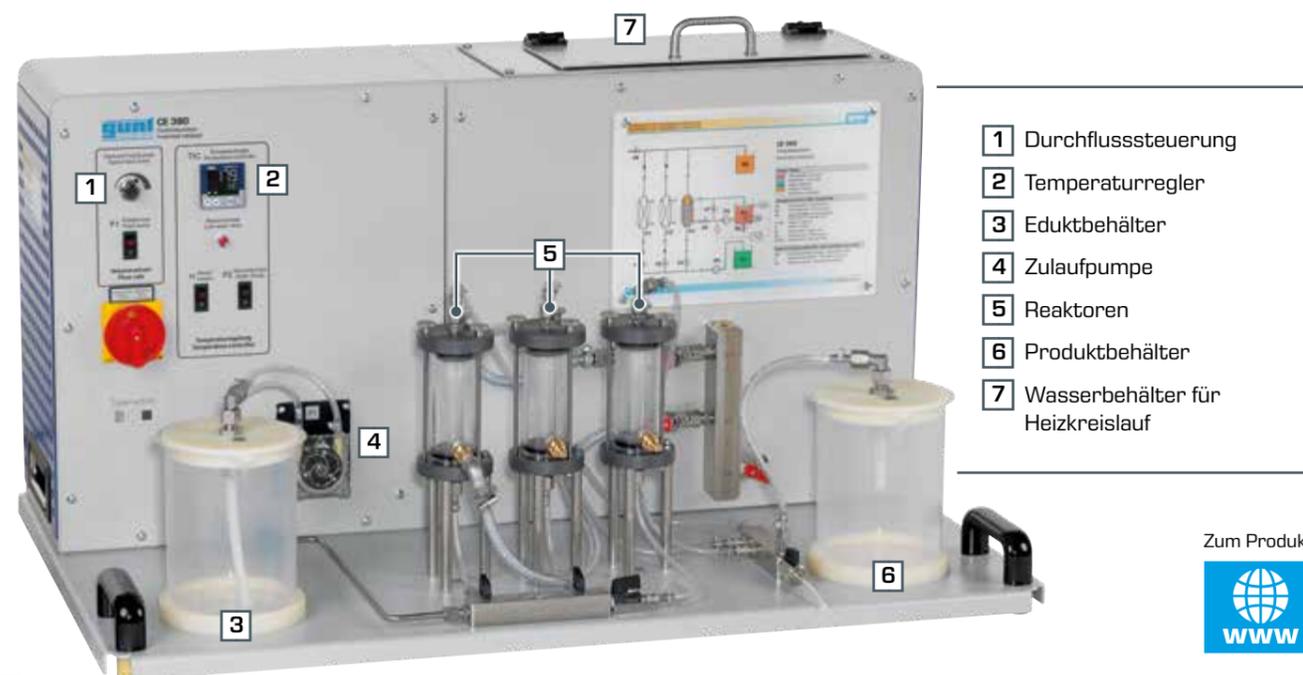
Chemische Reaktionen werden häufig mit Katalysatoren durchgeführt. Katalysatoren beschleunigen oder ermöglichen chemische Reaktionen überhaupt erst. Katalysatoren reduzieren die erforderliche Aktivierungsenergie oder stellen temporäre Verbindungen für andere Reaktionswege her. Katalysatoren gehen aus den Reaktionen unverändert hervor und stehen somit für die nächste Reaktion wieder zur Verfügung.

Bei einer **Festbettkatalyse** liegt der Katalysator als Festbett in einem Reaktor vor. Die Durchströmung mit den Ausgangsprodukten (Edukten) und die Reaktion in dem Festbett erfolgen kontinuierlich. Dies ermöglicht gleichbleibende Reaktionsbedingungen und eine höhere Produktausbeute.

Hauptkomponenten von CE380 sind drei Festbettreaktoren. Dadurch lassen sich drei Versuchsaufbauten mit beispielsweise jeweils anderen Katalysatormengen realisieren. Die Reaktoren sind als Doppelrohr gestaltet, wobei sich der Katalysator im inneren Rohr befindet. Der Bereich zwischen den beiden Rohren dient zur Beheizung der Reaktoren mit warmem Wasser. Der Durchfluss der Ausgangslösung, und somit die hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktor, lässt sich stufenlos einstellen.

### Lerninhalte

- Grundlagen der chemischen Katalyse
- Abhängigkeit der Reaktion von
  - ▶ Katalysatormasse
  - ▶ Temperatur
- Umgang mit einem fotometrischen Analysegerät
- Mengenbilanz erstellen
- Ermittlung der Ausbeute



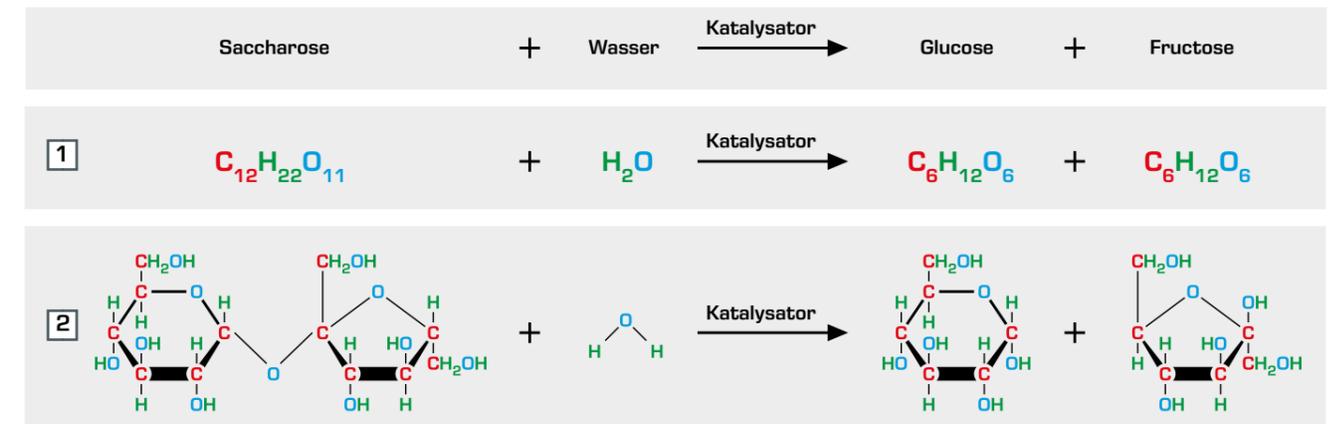
Zum Produkt:



### Katalysierte Hydrolyse von Saccharose

Als **Hydrolyse** bezeichnet man allgemein die Spaltung einer chemischen Verbindung durch die Reaktion mit Wasser. Ein Beispiel hierfür ist die Zersetzung von Saccharose in Glucose und Fructose. Diese Reaktion erfordert zusätzlich einen Katalysator. Glucose und Fructose weisen zwar die gleiche Summenformel auf, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anordnung der einzelnen Atome.

CE 380 ist für die Hydrolyse von Saccharose in Glucose und Fructose konzipiert. Als Katalysator dient ein stark saurer Ionenaustauscher, der im Lieferumfang enthalten ist.

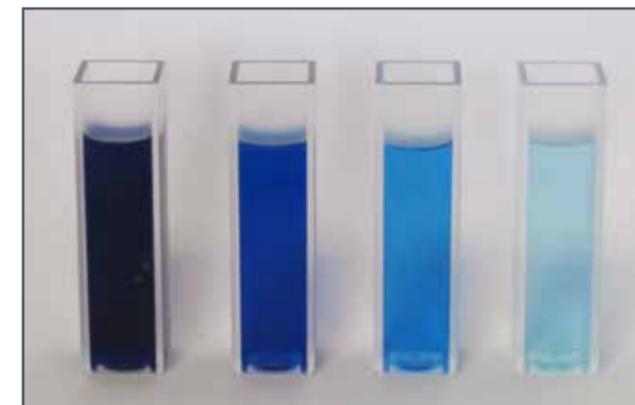


Hydrolyse von Saccharose: 1 Reaktionsgleichung und 2 Haworth-Projektionen

### Versuchsauswertung mit Fotometer

Die Umsatzrate ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung chemischer Reaktionen. Bei CE 380 erfolgt dies durch Bestimmung der Glucose-Konzentration im Reaktionsprodukt. Hierfür wird mit verschiedenen Chemikalien aus der Produktlösung zunächst ein Iod-Stärke-Komplex hergestellt. Charakteristisch für einen Iod-Stärke-Komplex ist eine blaue Farbe. Die Intensität der Färbung ist ein Maß für die Glucose-Konzentration.

Der Iod-Stärke-Komplex absorbiert Licht im gelb-orangen Bereich, so dass sich die Glucose-Konzentration fotometrisch bestimmen lässt. Für die Auswertung der Versuche wird das Gerät daher zusammen mit einem Fotometer geliefert. Die Daten des Fotometers werden auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe einer Software ausgewertet.



Iod-Stärke-Komplexe mit abnehmender Glucose-Konzentration von links nach rechts



Fotometer für die Versuchsauswertung

**CE 380**  
Festbettkatalyse**Beschreibung**

- chemische Festbettkatalyse
- drei Reaktoren für vergleichende Untersuchungen
- Analyse des Produktes mit Fotometer

Katalysatoren ermöglichen oder beschleunigen chemische Reaktionen. CE 380 ist konzipiert für die Zersetzungsreaktion von gelöster Saccharose in Glucose und Fructose.

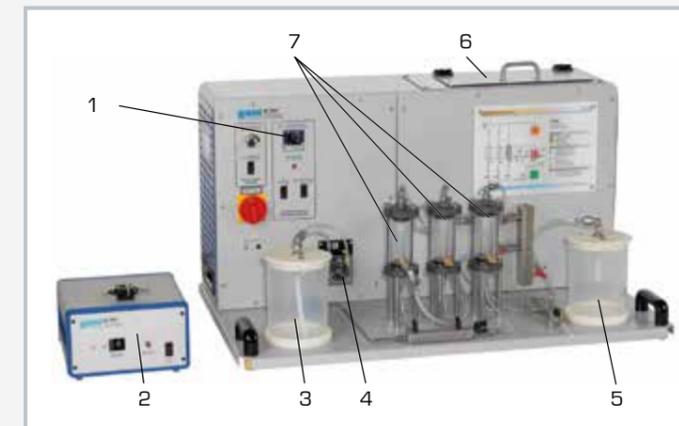
Eine Schlauchpumpe fördert das Edukt (Saccharoselösung) aus einem Behälter von unten in den Reaktor. Im Reaktor liegt der Katalysator als Festbett vor. Die Saccharoselösung durchströmt das Festbett. Dabei wird Saccharose in Glucose und Fructose zersetzt. Der Katalysator beschleunigt die Reaktion und erhöht somit die Ausbeute des Produktes (Glucose-Fructose-Gemisch). Das Produkt wird in einem Behälter gesammelt.

Drei Reaktoren ermöglichen den Vergleich unterschiedlicher Katalysen. Als chemischer Katalysator wird Austauscherharz verwendet. Ein geregelter Heizwasserkreislauf ermöglicht außerdem die Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Reaktion.

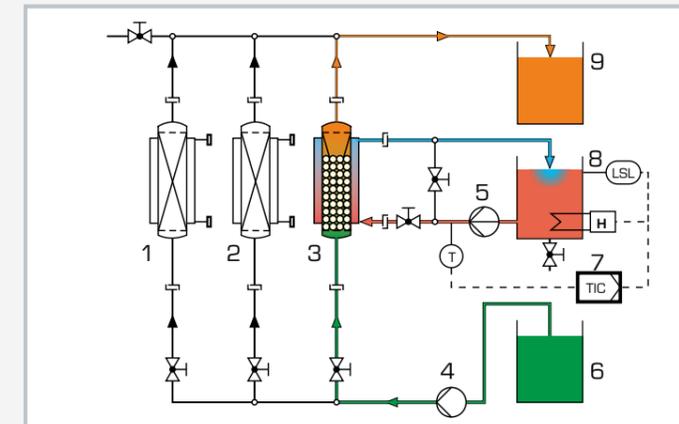
Zur Bestimmung der Glucosekonzentration im Produkt ist ein auf dieses Gerät abgestimmtes Fotometer im Lieferumfang enthalten. Die Daten des Fotometers werden auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe einer Software ausgewertet. Als Zubehör ist die Fließinjektionsanalyse (FIA) CE 380.01 optional erhältlich. Die FIA ermöglicht gegenüber der manuellen Analyse eine größere Anzahl von Messungen während des Versuchs, bei vermindertem Aufwand und verbesserter Reproduzierbarkeit.

**Lerninhalte / Übungen**

- Grundlagen der chemischen Katalyse
- Abhängigkeit der Reaktion von
  - ▶ Katalysatormasse
  - ▶ Temperatur
- Umgang mit einem fotometrischen Analysegerät
- Mengenbilanz erstellen
- Ermittlung der Ausbeute

**CE 380**  
Festbettkatalyse

1 Temperaturregler, 2 Fotometer, 3 Eduktbehälter, 4 Feedpumpe, 5 Produktbehälter, 6 Wasserbehälter für Heizkreislauf, 7 Reaktor



1-3 Reaktor, 4 Feedpumpe, 5 Pumpe Heizkreislauf, 6 Eduktbehälter, 7 Temperaturregler, 8 Wasserbehälter mit Heizer und Füllstandschalter, 9 Produktbehälter



Fotometer: 1 Küvettenhalter, 2 Anschluss Lichtquelle, 3 Anschluss Spektrometer

**Spezifikation**

- [1] Untersuchung einer katalytischen Reaktion
- [2] 3 Reaktoren aus PMMA zum Vergleich verschiedener Festbettkatalysen
- [3] Schlauchpumpe mit einstellbarer Drehzahl zur Förderung des Eduktes in die Reaktoren
- [4] geregelter Heizkreislauf mit Wasserbehälter, Heizer und Pumpe zur Temperierung der Reaktoren
- [5] je 1 skalierter Behälter für Edukt und Produkt
- [6] Fotometer zur Analyse des Produktes
- [7] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10 (Fotometer)
- [8] Fließinjektionsanalyse (CE 380.01) als Zubehör erhältlich

**Technische Daten****Reaktoren**

- Innendurchmesser: ca. 10mm
- Höhe: ca. 120mm

**Schlauchpumpe**

- max. Förderstrom: ca. 50mL/min

**Pumpe Heizkreislauf**

- max. Förderstrom: 10L/min
- max. Förderhöhe: 30m
- Leistungsaufnahme: 120W

**Heizwasserkreislauf**

- Behälter: ca. 7500mL
- Heizer: ca. 1kW

**Behälter für Edukt und Produkt**

- Volumen: ca. 2000mL
- Teilung, Skala: 50mL
- Material: PP

Wellenlänge Fotometer: 610nm

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional  
LxBxH: 1000x680x500mm (Versuchsgerät)  
LxBxH: 260x260x180mm (Fotometer)  
Gewicht: ca. 63kg

**Für den Betrieb erforderlich**

PC mit Windows

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsgerät
- 1 Fotometer
- 1 Gebinde chemischer Katalysator
- 1 CD mit Software für Fotometer
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## CE 380.01

### Fließinjektionsanalyse



#### Beschreibung

- professionelles Analysegerät für CE 380
- kontinuierliche fotometrische Bestimmung der Glucosekonzentration

Die Fließinjektionsanalyse (FIA) ergänzt CE 380. Sie nutzt das in CE 380 vorhandene Fotometer als Detektor, um das Reaktionsprodukt Glucose nachzuweisen.

Die Mehrkanalpumpe fördert permanent drei Flüssigkeitsströme in die FIA. Die gelösten Reaktionsprodukte von CE 380 und ein Nachweisreagenz werden zunächst in einer Kammer gemischt. Das Gemisch durchströmt anschließend eine spulenförmige Reaktionsschleife. Die Strömungsführung in der Reaktionsschleife ermöglicht eine gleichmäßige Verteilung aller Stoffe. In einer zweiten Mischkammer wird ein weiteres Nachweisreagenz hinzugefügt.

Nach der Durchströmung einer weiteren Reaktionsschleife tritt das Gemisch in die Durchflusszelle. Dort wird die Lichtintensität kontinuierlich mit dem Fotometer zur Bestimmung der Glucosekonzentration erfasst. Zur Auslösung der Verfärbung für die fotometrische Messung wird über ein Injektionsventil eine definierte Menge des Enzyms Glucoseoxidase (GOD) injiziert. Die Nachweisreagenzien und das Enzym GOD sind nicht im Lieferumfang enthalten.

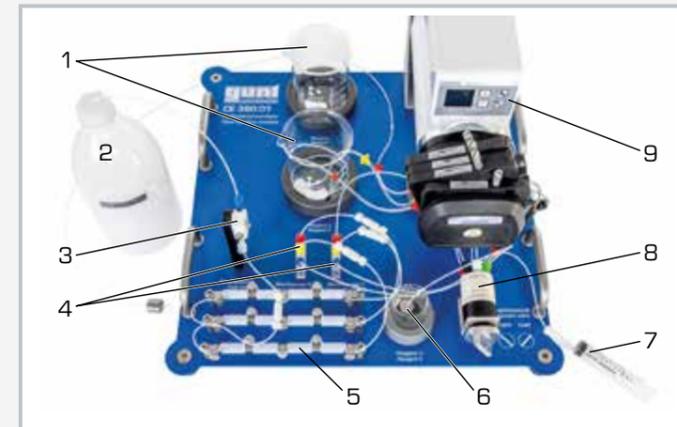
Verglichen mit der manuellen Analyse ist mit CE 380.01 eine größere Anzahl von Messungen während des Versuchs möglich. Zudem verbessert sich die Reproduzierbarkeit und der Aufwand zum Mischen für jede einzelne Probe entfällt.

#### Lerninhalte / Übungen

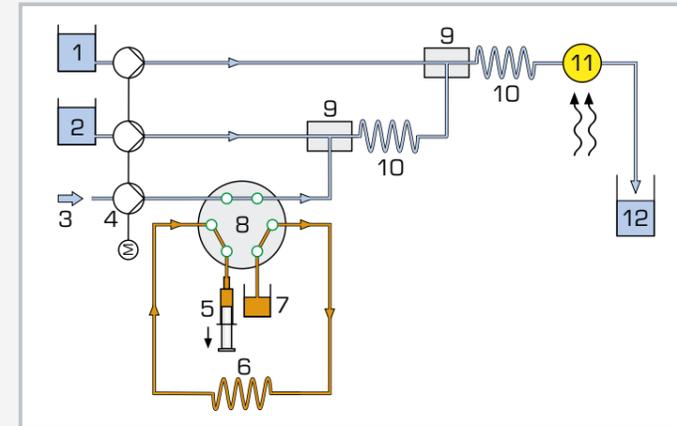
- Umgang mit der Fließinjektionsanalyse (FIA)
- Konzentrationsbestimmung
- Ermittlung der Ausbeute bei CE 380

## CE 380.01

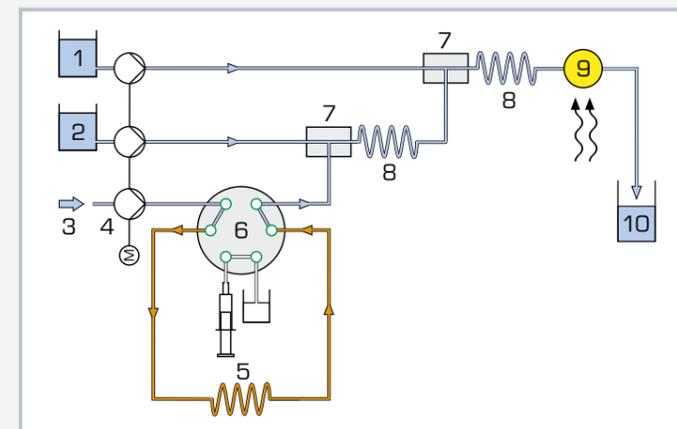
### Fließinjektionsanalyse



1 Behälter für Reagenz 1 und 2, 2 Abfall, 3 Durchflusszelle, 4 Mischkammern, 5 Reaktionsschleife, 6 Reagenz 3 GOD, 7 Injektionspritze, 8 Injektionsventil, 9 Mehrkanalschlauchpumpe



Laden der Injektionsschleife mit GOD: 1 Reagenz 2, 2 Reagenz 1, 3 Reaktionsprodukte von CE 380, 4 Mehrkanalschlauchpumpe, 5 Injektionspritze, 6 Injektionsschleife, 7 Reagenz 3 GOD, 8 Injektionsventil, 9 Mischkammern, 10 Reaktionsschleifen, 11 Durchflusszelle, 12 Abfall



Injektion von GOD: 1 Reagenz 2, 2 Reagenz 1, 3 Reaktionsprodukte von CE 380, 4 Mehrkanalschlauchpumpe, 5 Injektionsschleife, 6 Injektionsventil, 7 Mischkammer, 8 Reaktionsschleife, 9 Durchflusszelle, 10 Abfall

#### Spezifikation

- [1] kontinuierliche, fotometrische Bestimmung der Glucosekonzentration im Produkt von CE 380
- [2] Durchflusszelle aus PTFE zur Konzentrationsbestimmung mit Fotometer aus CE 380
- [3] Mehrkanalschlauchpumpe zur Förderung des Produkts von CE 380 und der Nachweisreagenzien
- [4] Injektionsventil, Injektionspritze und Injektionsschleife zur Zumischung des zum Nachweis notwendigen Enzyms GOD
- [5] 2 Mischkammern zur Mischung von Produkt und Nachweisreagenzien
- [6] 2 Reaktionsschleifen aus PTFE
- [7] 3 Bechergläser aus DURAN-Glas für Nachweisreagenzien und GOD
- [8] 1 Behälter für Abfälle

#### Technische Daten

Weglänge Durchflusszelle: 1 cm

Mehrkanalschlauchpumpe

- 4 Kanäle
- max. Förderstrom je Kanal: 11 mL/min bei 100min<sup>-1</sup> und Schlauch  $D_i=1,42\text{mm}$

Injektionsventil

- 6 Anschlüsse
- 2 Schaltstellungen

Schleifen

- Reaktionsschleifen: 1x 2000mm, 1x 4000mm
- Injektionsschleife: 1x 100mm

Behälter

- Nachweisreagenzien: 2x 250mL
- GOD: 1x 25mL
- Abfälle: 1x 1000mL
- Injektionspritze: 1x 10mL

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 400x400x200mm  
Gewicht: ca. 8kg

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsgerät
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz Zubehör
- 1 Anleitung

## CE 650 Biodieselanlage



Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

### Beschreibung

- chemische Umesterung
- zweistufiger Prozess
- Anlagensteuerung über SPS und Touchpanel
- integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone

Der Einsatz erneuerbarer Energieträger im Bereich der Mobilität kann durch den Ersatz fossiler Brennstoffe erfolgen. Eine Möglichkeit hierfür ist Biodiesel, der aus Pflanzenölen gewonnen wird. Die Herstellung erfolgt unter Zugabe von Methanol und Kaliumhydroxid (als Katalysator) und ist eine Umesterung, eine chemische Gleichgewichtsreaktion. Im großtechnischen Maßstab erfolgt die Produktion kontinuierlich in Rührkesselreaktoren. Dieser Prozess wird von CE 650 in kleinem Maßstab abgebildet.

Die chemische Reaktion läuft bei Temperaturen von ca. 60°C ab. Nach der eingestellten Verweilzeit verlassen die Produkte den Reaktor. Die Produkte liegen als zweiphasiges Stoffgemisch vor: eine biodieselreiche Phase und eine Phase mit Nebenprodukten. Die Nebenprodukte werden aus dem folgenden Phasentrenner (Abscheider) zum Lager gepumpt. Für die biodieselreiche Phase

bestehen diese Optionen: Rückführung zum Reaktor, 2. Umesterungsstufe, Methanolrückgewinnung (Destillation) und Biodieselwäsche (Absorption).

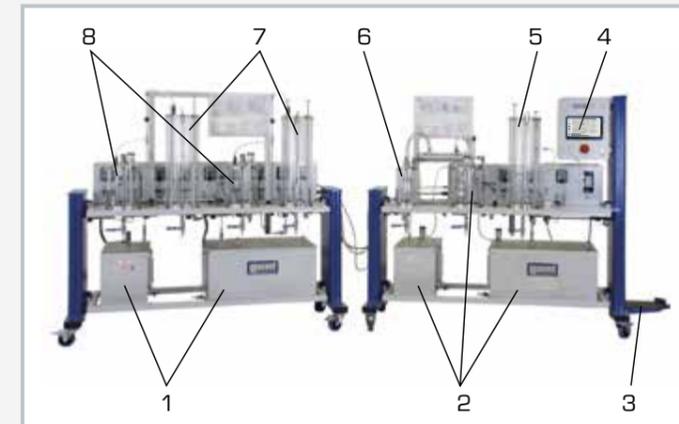
Die biodieselreiche Phase enthält neben Biodiesel noch Restmengen von Methanol, Kaliumhydroxid und Pflanzenöl. Das verbliebene Pflanzenöl wird in der 2. Umesterungsstufe zur Reaktion gebracht. Das Methanol wird in der Methanolrückgewinnung abdestilliert. Restmengen des Katalysators werden in der Biodieselwäsche entfernt. Abschließend erfolgt die Lagerung der Produkte.

Der Umsatz der Umesterung ist abhängig von der Reaktionszeit und der Temperatur. Das chemische Gleichgewicht wird durch die Abtrennung der Nebenprodukte verschoben. Die Analyse des hergestellten Biodiesels erfolgt im Labor. Die Prozessparameter können zur Untersuchung der Abhängigkeiten variiert werden. CE 650 wird mit einer SPS über Touchpanel gesteuert. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten via WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit dem kundeneigenen Netzwerk möglich.

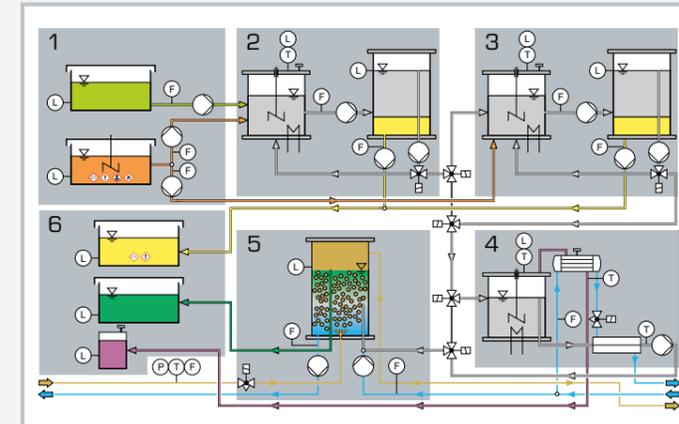
### Lerninhalte / Übungen

- Erzeugung von Biodiesel aus Pflanzenöl
  - ▶ Einfluss der Verweilzeit
  - ▶ Einfluss der Temperatur
- chemische Umesterung
- Phasentrennung im Schwerkraftfeld
- Destillation
- Flüssig-Flüssig-Extraktion
- Anfahren eines kontinuierlichen Prozesses, bestehend aus mehreren Grundoperationen
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

## CE 650 Biodieselanlage



1 Versorgungsbehälter, 2 Lager, 3 Gasflaschenhalter, 4 SPS mit Touchpanel, 5 Biodieselwäscher, 6 Methanolrückgewinnung, 7 Phasentrenner, 8 Reaktor



Prozessschema der Versuchsanlage  
1 Versorgung, 2 Umesterung 1. Stufe, 3 Umesterung 2. Stufe, 4 Methanolrückgewinnung, 5 Biodieselwäsche, 6 Lager



Startmaske der SPS für die Bedienung der Versuchsanlage

### Spezifikation

- 1] chemische Umesterung von Pflanzenölen
- 2] zweistufiger, kontinuierlicher Prozess
- 3] 2 beheizte Rührkesselreaktoren für die chemische Umesterung
- 4] 2 Phasentrenner (Abscheider) zum Trennen der Produkte und der Nebenprodukte
- 5] Methanolrückgewinnung (Destillation) zur Reduktion der benötigten Methanolmenge
- 6] Biodieselwäsche (Absorption) zur Extraktion von Verunreinigungen aus dem Biodiesel
- 7] Variation von Prozessparametern zur Untersuchung der Abhängigkeiten der Biodieselherstellung
- 8] SPS zur Steuerung der Anlage
- 9] Touchpanel für die Bedienung der SPS
- 10] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk

### Technische Daten

SPS: Eaton XV303

#### Behälter

- Rührkesselreaktoren: 2x 5L
- Vorratsbehälter (Pflanzenöl): 110L
- Vorratsbehälter (Chemikalien): 45L
- Produktbehälter: 110L
- Nebenproduktbehälter: 45L
- Methanolbehälter: 6L
- Phasentrenner/Biodieselwäscher: 3x 15L

Schlauchpumpen: max. 25L/h

#### Messbereiche

- Temperatur: 6x 0...100°C
- Druck: 1x 0...6bar (abs.)
- Durchfluss: 11x 0...30L/h
- Füllstand:
  - ▶ 3x 1...22cm
  - ▶ 2x 1...29cm

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
1x LxBxH: 1900x790x1700mm  
1x LxBxH: 2200x790x1700mm  
Gewicht: ca. 560kg

### Für den Betrieb erforderlich

Pflanzenöl, Kaliumhydroxid, Methanol, Stickstoff  
0,06kg/h min. 2bar; Wasseranschluss +  
Abfluss 400L/h, min. 2bar; Abluft +  
Belüftung 245m<sup>3</sup>/h

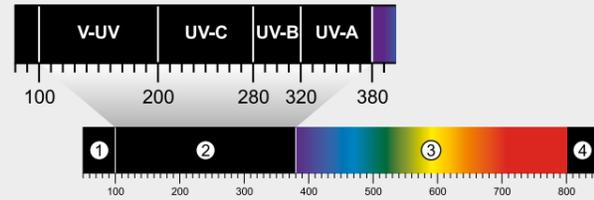
### Lieferumfang

- 1] Versuchsanlage
- 1] Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen

## Fotochemische Aktivierung

Bei der fotochemischen Aktivierung wird die Aktivierungsenergie zur Ermöglichung oder Beschleunigung der Reaktion durch elektromagnetische Strahlung aufgebracht. Atome oder Moleküle absorbieren die Strahlung und erreichen somit einen energiereicheren, aktivierten Zustand. Für einen effektiven Ablauf der Reaktion ist es wichtig, dass das Emissionsspektrum (Wellenlängenbereich) der eingesetzten Lichtquelle den Absorptionsspektren der reagierenden Stoffe möglichst ähnlich ist.



Spektrum elektromagnetischer Wellen:

1 Röntgen-Strahlung, 2 ultraviolette Strahlung, 3 sichtbares Licht, 4 Infrarot-Strahlung

Bei den großtechnisch genutzten fotochemischen Reaktionen führt die elektromagnetische Strahlung zur Bildung von Radikalen. Grundsätzliches Merkmal von Radikalen ist das Vorhandensein eines einzelnen, freien Elektrons anstelle eines Elektronenpaares. Dieses Elektron verleiht dem Radikal seine große Reaktionsfreudigkeit und ermöglicht die für den industriellen Prozess notwendigen Reaktionsgeschwindigkeiten. Ein Vorteil der fotochemischen Aktivierung ist die Möglichkeit der gezielten Anregung bestimmter chemischer Bindungen durch die Auswahl eines geeigneten Emissionsspektrums. Ein weiterer Vorteil ist die leichte Beeinflussbarkeit der Reaktionsgeschwindigkeit durch Zu- oder Abschalten von Lichtquellen.

Folgende Anwendungen sind Beispiele für die industrielle Nutzung fotochemischer Reaktionen:

- Chlorierung von Kohlenwasserstoffen
- Herstellung von Vitamin D
- Herstellung von Polyvinylchlorid (PVC)
- Behandlung von Abwasserinhaltsstoffen

Für die Erzeugung der elektromagnetischen Strahlung werden überwiegend Lampen eingesetzt, die auf dem Prinzip der Gasentladung beruhen. Als Gas wird in der Regel Quecksilberdampf verwendet.

Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwischen folgenden Lampenarten:

#### ■ Niederdruck-Lampen

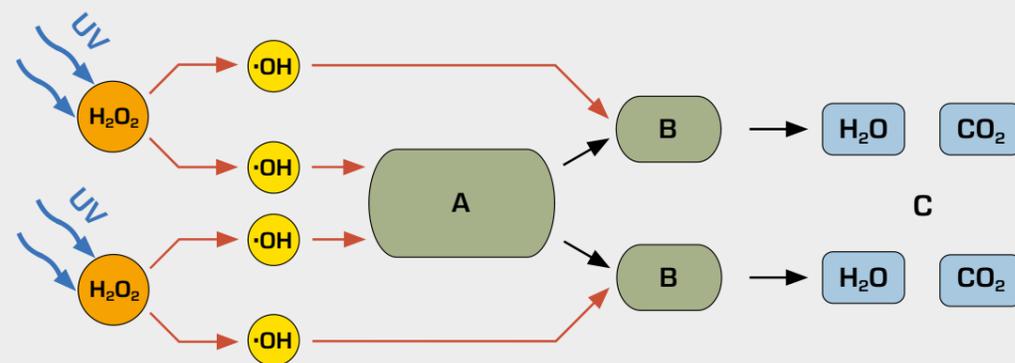
Diese Lampen liefern ein nahezu monochromatisches Licht (Licht einer einzigen Wellenlänge) der Wellenlänge 254 nm (UV-C).

#### ■ Mitteldruck-Lampen

Diese Lampen emittieren Strahlung mit verschiedenen Wellenlängen im UV-Bereich und im sichtbaren Bereich. Das Emissionsspektrum liegt im Bereich von 200...600nm.

#### ■ Hochdruck-Lampen

Das Spektrum dieser Lampen reicht vom kurzwelligen UV-Bereich (V-UV) bis weit in den sichtbaren Bereich hinein und ist bei vielen fotochemischen Reaktionen wirksam.



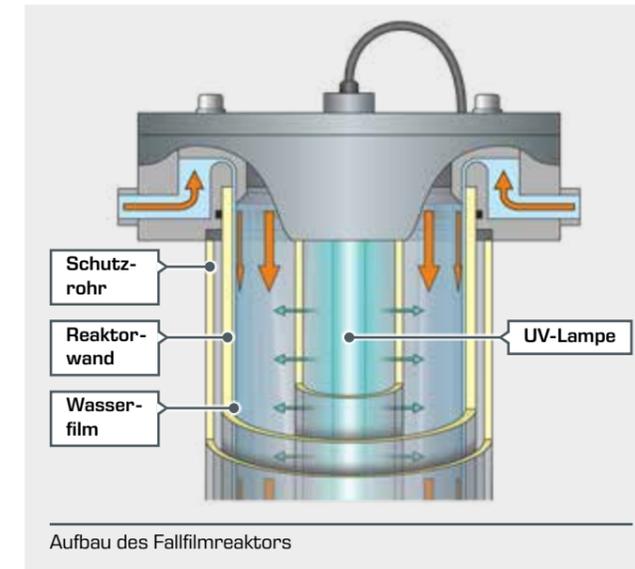
Beispiel einer fotochemisch aktivierten Reaktion zum Abbau organischer, biologisch nicht abbaubarer Stoffe:

$H_2O_2$  Wasserstoffperoxid,  $\cdot OH$  Hydroxylradikal,  $A$  organischer, biologisch nicht abbaubarer Stoff  
 $B$  organische Zwischenprodukte,  $C$  anorganische Endprodukte

## Übersicht

## CE 584 Erweiterte Oxidation

## Fallfilmreaktor im Batch-Betrieb



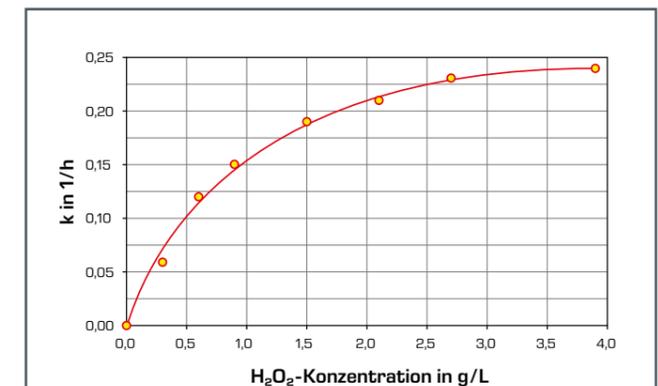
Aufbau des Fallfilmreaktors

Erweiterte Oxidationsverfahren sind in der Wasserbehandlung Stand der Technik. Mit diesem Gerät können Sie die Oxidation biologisch nicht abbaubarer organischer Stoffe unter Verwendung von Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) und UV-Strahlung untersuchen. Der didaktische Schwerpunkt liegt in der experimentellen Anwendung reaktionskinetischer Zusammenhänge.

Hauptkomponente des Gerätes ist ein Fallfilmreaktor, der diskontinuierlich betrieben wird. Das mit Wasserstoffperoxid versetzte Rohwasser wird aus einem Behälter in eine Rinne am oberen Ende des Reaktors gepumpt. Über eine Überfallkante strömt das Wasser an der Innenwand des Reaktors entlang als dünner Film nach unten und gelangt schließlich wieder in den Behälter. In der Mitte des Reaktors befindet sich eine UV-Lampe. Durch die Bestrahlung mit UV-Licht (254 nm) wird das Wasserstoffperoxid in die gewünschten OH-Radikale gespalten.

## Didaktisches Begleitmaterial

Das didaktische Begleitmaterial stellt ausführlich die Grundlagen des Verfahrens sowie die reaktionskinetischen Zusammenhänge dar. Darüber hinaus wird exemplarisch ein durchgeführter Versuch detailliert beschrieben und ausgewertet.



Auszug aus der Anleitung von CE 584: Geschwindigkeitskonstante  $k$  in Abhängigkeit von der eingesetzten  $H_2O_2$ -Menge. Als organischer Schadstoff wurde Triethylglycoldimethylether verwendet.



Zum Produkt:



## Lerninhalte

- Aufnahme von Konzentrations-Zeit-Verläufen
- Untersuchung der Reaktionskinetik
  - ▶ Reaktionsordnung
  - ▶ Reaktionsgeschwindigkeit
- Einfluss der  $H_2O_2$ -Menge auf den Reaktionsverlauf

## CE 584

### Erweiterte Oxidation



#### Lerninhalte / Übungen

- Oxidation mit Wasserstoffperoxid und UV-Licht kennenlernen
- Aufnahme von Abbaukurven zur Untersuchung der Reaktionskinetik
- Einfluss der Wasserstoffperoxid-Menge auf den Prozess

2E

#### Beschreibung

- Oxidation organischer Stoffe mit Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) und UV-Licht
- diskontinuierlicher Betrieb mit Fallfilmreaktor

In der Wasserbehandlung dienen Oxidationsverfahren zur Entfernung organischer, biologisch nicht abbaubarer Stoffe. Erfolgt die Oxidation durch Hydroxylradikale (OH-Radikale) spricht man von "Erweiterter Oxidation". Eine gängige Methode zur Bildung von Hydroxylradikalen ist die Bestrahlung von Wasserstoffperoxid mit UV-Licht. CE 584 demonstriert dieses Verfahren mit Hilfe eines diskontinuierlich betriebenen Fallfilmreaktors.

Der Fallfilmreaktor besteht aus einem transparenten Rohr, das am unteren Ende offen ist. Am oberen Ende des Rohres ist eine umlaufende Rinne angebracht.

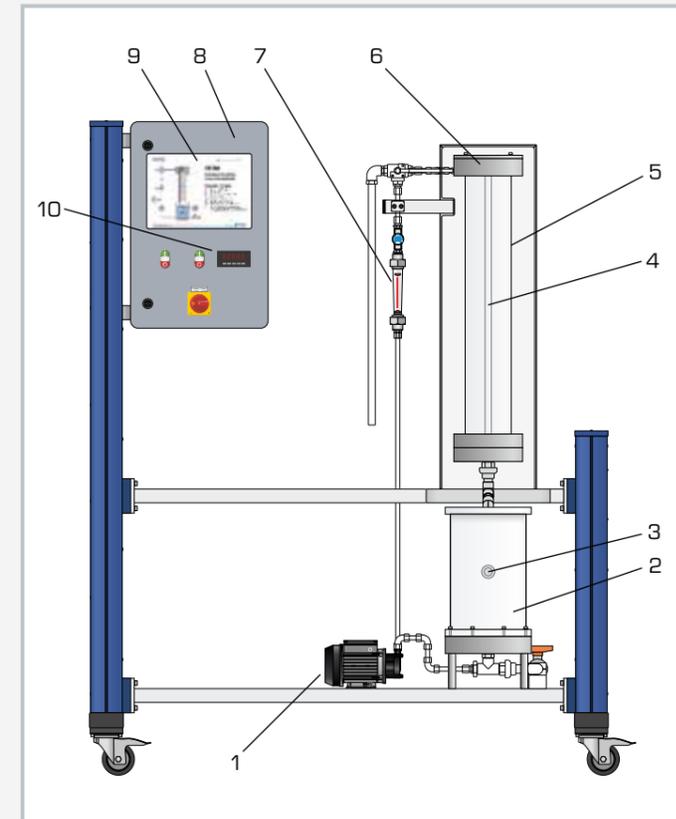
Das mit Wasserstoffperoxid versehene Rohwasser wird mit einer Pumpe aus einem Behälter in die Rinne gefördert. Von hier fließt das Wasser als dünner Fallfilm entlang der Innenwandung des Rohres wieder zurück in den Behälter. Auf diese Weise entsteht ein geschlossener Wasserkreislauf. In der Mitte des Rohres befindet sich eine UV-Lampe. Durch die Bestrahlung des herabfließenden Rohwassers mit UV-Licht bilden sich aus den Wasserstoffperoxid-Molekülen Hydroxylradikale. Die Hydroxylradikale oxidieren die im Rohwasser enthaltenen organischen, biologisch nicht abbaubaren Stoffe. Zum Schutz vor der Strahlung ist die UV-Lampe mit einem Schutzrohr ausgestattet.

Durchfluss und Temperatur des Wassers werden kontinuierlich erfasst. Die Temperatur wird am Schaltschrank digital angezeigt. Es ist möglich, am Behälter Proben zu nehmen.

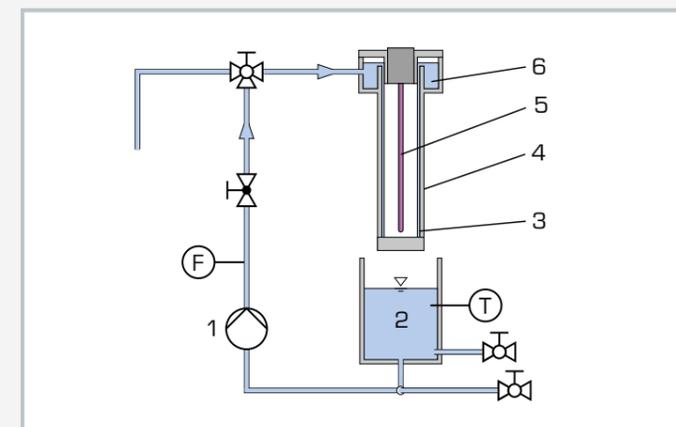
Zur Herstellung des Rohwassers kann z.B. Triethylenglycoldimethylether verwendet werden. Zur Auswertung der Versuche ist Analysetechnik erforderlich.

## CE 584

### Erweiterte Oxidation



1 Pumpe, 2 Behälter, 3 Temperaturenfnehmer, 4 UV-Lampe mit Schutzrohr, 5 Fallfilmreaktor (Rohr), 6 Rinne, 7 Durchflussmesser, 8 Schaltschrank, 9 Prozessschema, 10 digitale Temperaturanzeige



1 Pumpe, 2 Behälter, 3 Fallfilm, 4 Fallfilmreaktor (Rohr), 5 UV-Lampe, 6 Rinne; F Durchfluss, T Temperatur

#### Spezifikation

- [1] erweitertes Oxidationsverfahren
- [2] Einsatz von Wasserstoffperoxid und UV-Licht
- [3] Bildung von Hydroxylradikalen (OH-Radikale)
- [4] Fallfilmreaktor mit UV-Lampe
- [5] diskontinuierlicher Betrieb
- [6] Durchfluss einstellbar
- [7] Erfassung von Temperatur und Durchfluss
- [8] digitale Temperaturanzeige
- [9] Schutzvorrichtung für die UV-Strahlung

#### Technische Daten

##### Fallfilmreaktor (Rohr)

- $\varnothing$  130mm
- Höhe: 1000mm
- Material: Glas

##### UV-Lampe

- emittierte Wellenlänge: 254nm
- Leistung: 120W

##### Pumpe

- max. Förderstrom: 360L/h
- max. Förderhöhe: 9m

##### Behälter

- Volumen: 10L

##### Messbereiche

- Durchfluss: 30...320L/h
- Temperatur: 0...50°C

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1510x790x1900mm  
Gewicht: ca. 170kg

#### Für den Betrieb erforderlich

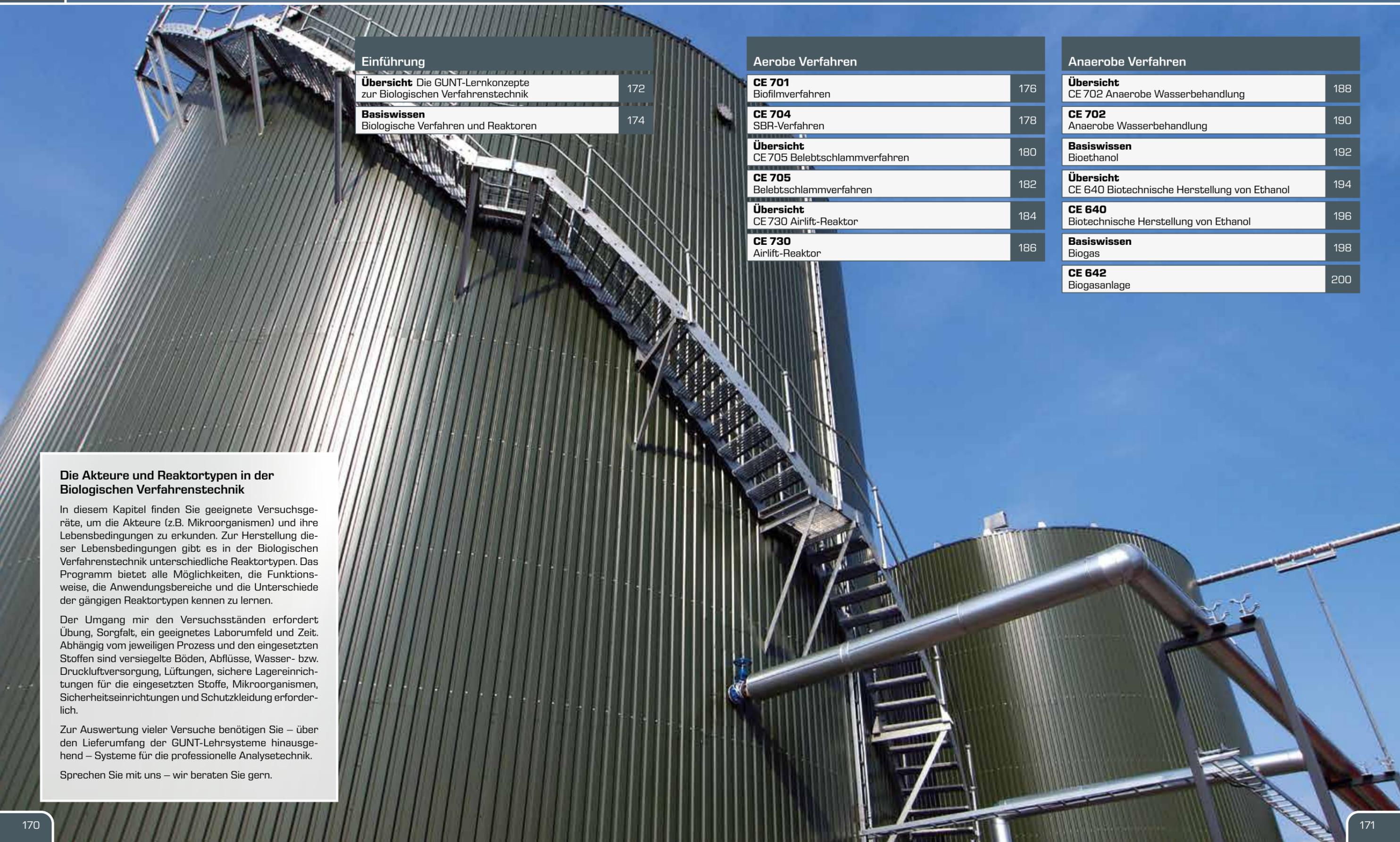
Wasseranschluss, Abfluss, Wasserstoffperoxid, Triethylenglycoldimethylether (Empfehlung)

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial



# Biologische Verfahrenstechnik



<b>Einführung</b>	
<b>Übersicht</b> Die GUNT-Lernkonzepte zur Biologischen Verfahrenstechnik	172
<b>Basiswissen</b> Biologische Verfahren und Reaktoren	174

<b>Aerobe Verfahren</b>	
<b>CE 701</b> Biofilmverfahren	176
<b>CE 704</b> SBR-Verfahren	178
<b>Übersicht</b> CE 705 Belebtschlammverfahren	180
<b>CE 705</b> Belebtschlammverfahren	182
<b>Übersicht</b> CE 730 Airlift-Reaktor	184
<b>CE 730</b> Airlift-Reaktor	186

<b>Anaerobe Verfahren</b>	
<b>Übersicht</b> CE 702 Anaerobe Wasserbehandlung	188
<b>CE 702</b> Anaerobe Wasserbehandlung	190
<b>Basiswissen</b> Bioethanol	192
<b>Übersicht</b> CE 640 Biotechnische Herstellung von Ethanol	194
<b>CE 640</b> Biotechnische Herstellung von Ethanol	196
<b>Basiswissen</b> Biogas	198
<b>CE 642</b> Biogasanlage	200

### Die Akteure und Reaktortypen in der Biologischen Verfahrenstechnik

In diesem Kapitel finden Sie geeignete Versuchsgeschäfte, um die Akteure (z.B. Mikroorganismen) und ihre Lebensbedingungen zu erkunden. Zur Herstellung dieser Lebensbedingungen gibt es in der Biologischen Verfahrenstechnik unterschiedliche Reaktortypen. Das Programm bietet alle Möglichkeiten, die Funktionsweise, die Anwendungsbereiche und die Unterschiede der gängigen Reaktortypen kennen zu lernen.

Der Umgang mit den Versuchsständen erfordert Übung, Sorgfalt, ein geeignetes Laborumfeld und Zeit. Abhängig vom jeweiligen Prozess und den eingesetzten Stoffen sind versiegelte Böden, Abflüsse, Wasser- bzw. Druckluftversorgung, Lüftungen, sichere Lagereinrichtungen für die eingesetzten Stoffe, Mikroorganismen, Sicherheitseinrichtungen und Schutzkleidung erforderlich.

Zur Auswertung vieler Versuche benötigen Sie – über den Lieferumfang der GUNT-Lehrsysteme hinausgehend – Systeme für die professionelle Analysetechnik.

Sprechen Sie mit uns – wir beraten Sie gern.

# Die GUNT-Lernkonzepte zur Biologischen Verfahrenstechnik

## Womit beschäftigt sich die Biologische Verfahrenstechnik?

Gegenstand der Biologischen Verfahrenstechnik sind Stoffumwandlungen, die biologischer Natur sind. Folgende Akteure führen diese Stoffumwandlungen durch:

- komplette, lebendige Organismen mit einer oder wenigen Zellen, wie z.B. Bakterien, Pilze oder Algen
- biologisch aktive, isolierte Einzelteile von Organismen, wie z.B. tierische oder pflanzliche Zellen
- biologisch aktive, isolierte Teile von Zellen, wie z.B. Enzyme

Die Bioverfahrenstechnik hat die Aufgabe, die optimalen Bedingungen für diese Organismen, Zellen und Zellteile bereitzustellen. Die Erkenntnisse der Biologie, Biochemie etc. werden in industriellen Prozessen großtechnisch umgesetzt. Beispiele für typische Prozesse sind:

- Herstellung von Medikamenten
- Herstellung von Chemikalien
- Herstellung von Lebensmitteln
- Reinigung von Böden, Luft und Abwässern
- Herstellung von Energieträgern aus Biomasse



Beispiele für Akteure in der Biologischen Verfahrenstechnik:

**1** *Aspergillus niger*: Schimmelpilz zur Herstellung von Citronensäure, **2** *Paramecium* (Pantoffeltierchen): Mikroorganismus für die biologische Abwasserreinigung, **3** *Saccharomyces cerevisiae*: Hefe zur Herstellung von Ethanol



Biologische Reinigungsstufe auf einer Kläranlage (Belebungsbecken)

## Unsere Lehrsysteme für die Biologische Verfahrenstechnik

### Aerobe Verfahren

- CE 701 Biofilmverfahren
- CE 704 SBR-Verfahren
- CE 705 Belebtschlammverfahren
- CE 730 Airlift-Reaktor

### Anerobe Verfahren

- CE 702 Anaerobe Wasserbehandlung
- CE 640 Biotechnische Herstellung von Ethanol
- CE 642 Biogasanlage

## Aerobe und anaerobe Verfahren

Eine wichtige Unterscheidung biologischer Verfahren besteht in dem Umstand, ob die mikrobiologischen Prozesse unter aeroben oder anaeroben Bedingungen ablaufen. Aufgabe der Biologischen Verfahrenstechnik ist es, für die jeweiligen Mikroorganismen möglichst optimale Umgebungsbedingungen zu schaffen. Im Falle obligat anaerober Mikroorganismen ist dies Abwesenheit von Sauerstoff. Bei aeroben Mikroorganismen muss hingegen eine ausreichende und möglichst gleichmäßige Versorgung mit Sauerstoff gewährleistet sein.

Beim aeroben Stoffwechsel ist der Energiegewinn für die Mikroorganismen höher als beim anaeroben Stoffwechsel. Die aeroben Mikroorganismen vermehren sich dementsprechend schneller und mehr Biomasse fällt an.



SPS mit Touchscreen



CE 642 Biogasanlage

## Basiswissen

## Biologische Verfahren und Reaktoren

Grundsätzlich gibt es in der Biologischen Verfahrenstechnik eine Vielzahl unterschiedlichster Verfahren. Die Basis jedes Verfahrens sind Akteure wie Organismen, Zellen oder Enzyme. Je nach gewünschten Produkten und Ausgangsstoffen werden die jeweiligen Akteure ausgewählt. Die Kenntnisse darüber welche Akteure für welchen Anwendungsfall geeignet sind, stammen aus Grundlagendisziplinen wie der Biologie, Biochemie etc.

Diese Disziplinen liefern auch die Kenntnisse, welche Umgebungsbedingungen für die Akteure optimal sind, um eine hohe Qualität und Quantität der Produkte zu gewährleisten. Anhand dieser Kenntnisse wird der jeweilige Produktionsprozess entwickelt. Die einzelnen Schritte für viele Prozesse und deren Abfolge ähneln sich.

## Grundsätzliche Prozessschritte

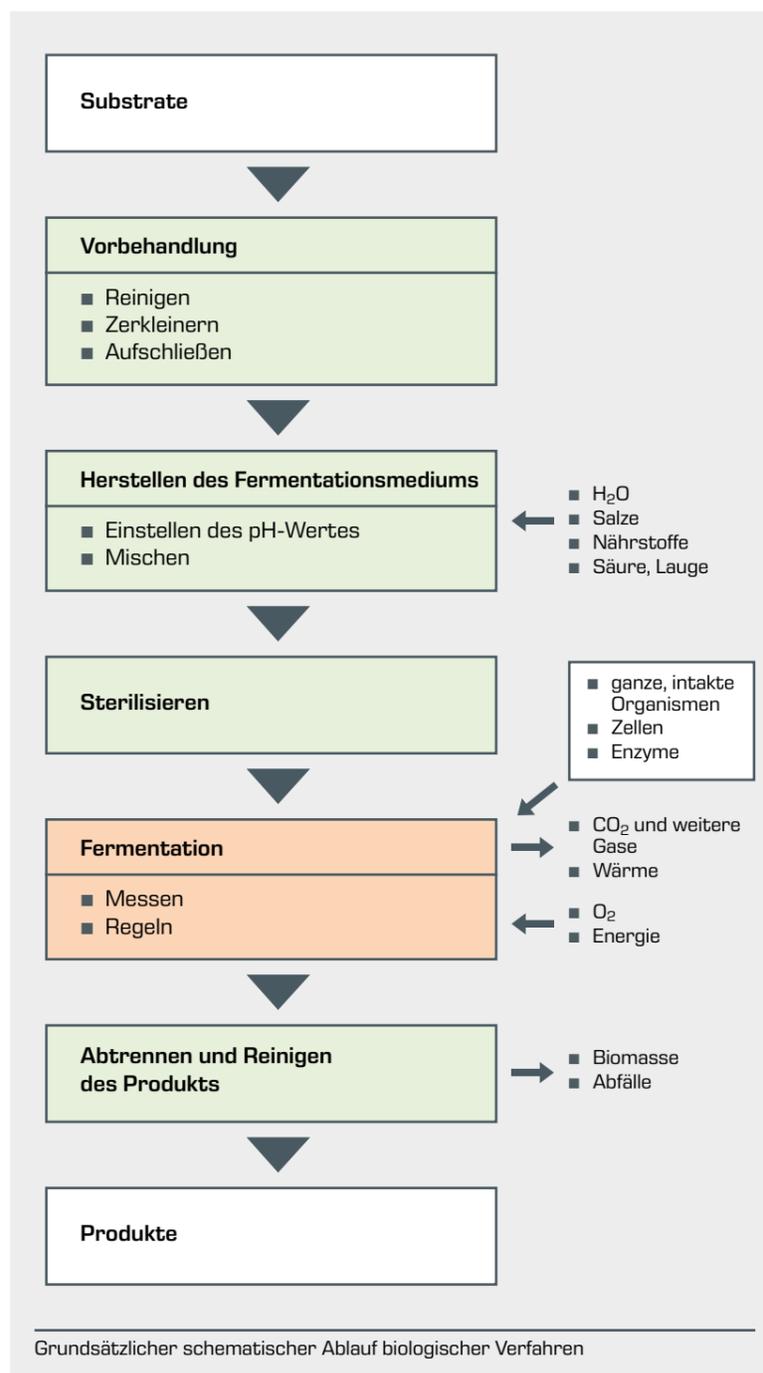
Die Ausgangsstoffe werden auch als Substrate bezeichnet. Bei den Substraten kann es sich um reine Stoffe wie Zucker oder Alkohol handeln. Oftmals müssen diese Stoffe erst aus komplexeren Substraten wie Melasse, Schlempen etc. durch Verfahren wie z.B. Zerkleinerung für die biologischen Akteure verfügbar gemacht werden.

Unter Zugabe von Wasser, Salzen und Nährstoffen erfolgt anschließend die Herstellung des für die Akteure optimalen Fermentationsmediums. Eine wichtige Rolle spielt hierbei oftmals die Einstellung des pH-Wertes.

Viele biologische Prozesse erfordern den gezielten Ausschluss von Fremdkeimen, um konkurrierende Mikroorganismen und Reaktionen zu hemmen. Dies erfordert die Sterilisation des Fermentationsmediums und des Reaktors.

Der eigentliche Herstellungsprozess (Fermentation) findet im Reaktor statt. Dort setzen Akteure wie Organismen, Zellen und Enzyme die Ausgangsstoffe in Produkte um. Der Reaktor muss genau auf die jeweiligen Akteure abgestimmt sein. Bei aeroben Prozessen spielt z.B. die gleichmäßige Versorgung aller Bereiche mit Sauerstoff eine große Rolle. Des Weiteren ist Regelung der Temperatur durch die Zu- oder Abführung von Wärme wichtig.

Das den Reaktor verlassende Fermentationsmedium ist ein komplexes Gemisch, in dem das Produkt verdünnt oder noch in den Zellen vorliegt. Dementsprechend werden zur Abtrennung der Feststoffe Verfahren wie Filtration, Zentrifugation oder Sedimentation eingesetzt. Die Öffnung der Zellen erfolgt z.B. durch mechanische Einwirkung oder osmotischen Druck. Zum Aufkonzentrieren und Reinigen kommen Verfahren wie Extraktion, Adsorption oder Fällung zum Einsatz.



## Bioreaktoren

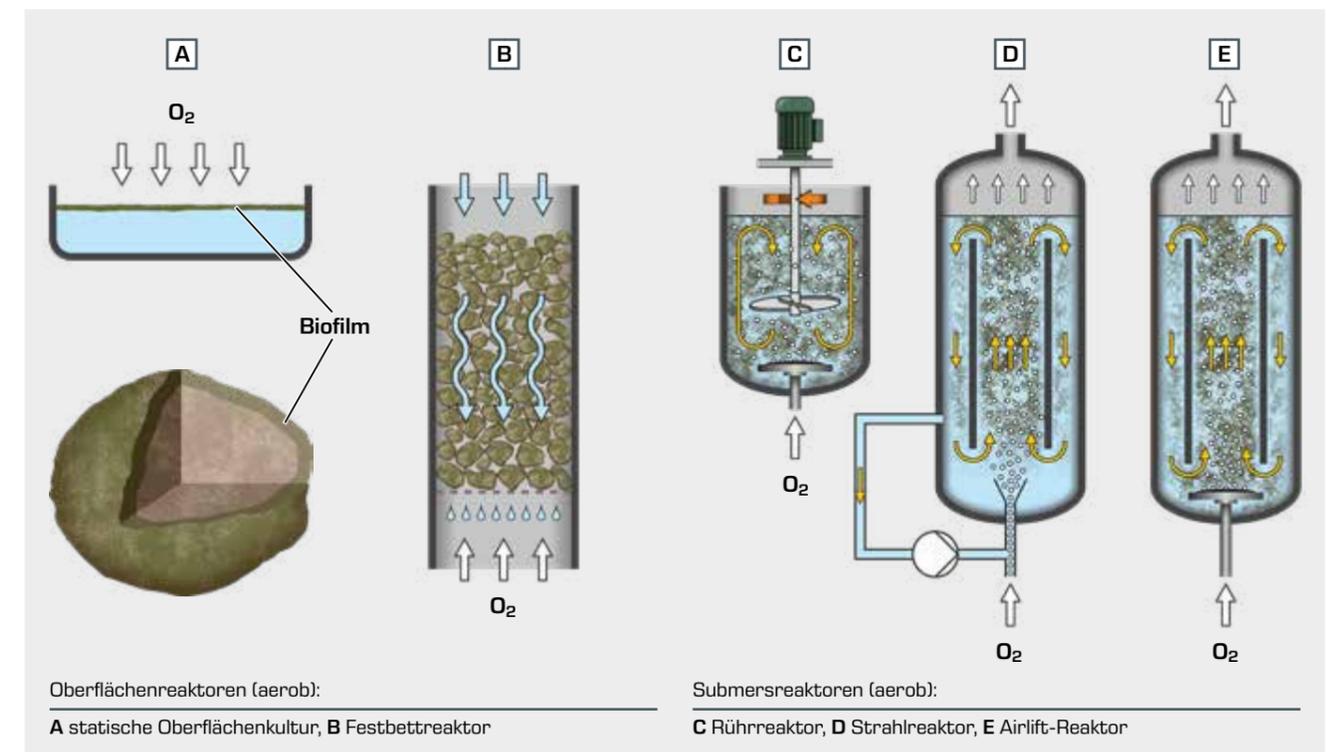
Der Bioreaktor ist das Kernelement der biotechnischen Produktionsanlage. Eine der Hauptaufgaben ist eine optimale Durchmischung des Reaktorinhaltes, um einen möglichst häufigen Kontakt der Nährstoffe und der biologischen Akteure zu gewährleisten. Des Weiteren ist die Schaffung einer möglichst großen Grenzfläche zwischen der Gasphase und der Flüssigkeit von Bedeutung. Bei aeroben Verfahren geht es um den Transport von Sauerstoff zu den biologischen Akteuren. Bei anaeroben Verfahren ist der rasche Abtransport von erzeugten Gasen wie Methan zu gewährleisten. Grundsätzlich werden Oberflächenreaktoren und Submersreaktoren unterschieden.

## Oberflächenreaktoren

Die biologischen Akteure haften als Biofilm auf der Oberfläche flüssiger oder fester Stoffe. Bei aeroben Verfahren erfolgt der Sauerstoffeintrag direkt aus der an den Biofilm angrenzenden Gasphase.

Das einfachste Verfahren ist die **statische Oberflächenkultur (A)**, bei der sich flüssiges Substrat in einer flachen Schale befindet. Auf der Oberfläche des Substrates schwimmt ein Biofilm, der von unten mit Nährstoffen und von oben mit Sauerstoff versorgt wird.

Bei den Bettreaktoren ist der Biofilm auf einer Feststoffoberfläche fixiert. In Wirbelschichtreaktoren kann sich der Feststoff frei in der Flüssigkeit bewegen. In **Festbettreaktoren (B)** bewegt sich der Feststoff nicht. Das flüssige Substrat rieselt von oben durch das Festbett. Bei aeroben Reaktoren erfolgt die Versorgung mit Sauerstoff von unten.



## Submersreaktoren

Im Gegensatz zu Oberflächenreaktoren muss bei Submersreaktoren die Grenzfläche zwischen Gasphase und Flüssigkeit durch Dispergierung des Gases in der Flüssigkeit aufrecht erhalten werden. Hierzu muss kontinuierlich Energie in den Prozess eingetragen werden. Nach Art des Energieeintrags unterscheidet man drei Gruppen:

## Energieeintrag mit Rührorganen

Bei aeroben Verfahren wird von unten komprimierte Luft in den **Rührreaktor (C)** geleitet. Ein Rührorgan sorgt für die feine Zerteilung der Luftblasen und die Verteilung von Nährstoffen. Ein Nachteil können hohe Scherkräfte und die Zerstörung von Mikroorganismen sein.

## Energieeintrag durch Flüssigkeitspumpe

Eine Pumpe wälzt den gesamten Reaktorinhalt über eine externe Schleife um. Es gibt mehrere Varianten, die sich durch die Orte der Ansaugung und des Eintrages der Flüssigkeit unterscheiden. Bei **Strahlreaktoren (D)** erzeugt die Pumpe einen Treibstrahl, der für die Umwälzung im Reaktor sorgt.

## Energieeintrag durch Begasung

Die Luftblasen selbst sorgen durch einen Dichteunterschied für die Umwälzung des Reaktorinhaltes. Der Umlauf kann innerhalb oder außerhalb des Reaktors erfolgen. Beim **Airlift-Reaktor (E)** sorgen Leiteinrichtungen für einen internen Umlauf. Er zeichnet sich im Vergleich zum Rührreaktor durch geringe auftretende Scherkräfte und einen geringen Energieverbrauch aus.

## CE 701 Biofilmverfahren



Die Abbildung zeigt: Versorgungseinheit (links) und Versuchsstand (rechts)

### Beschreibung

- **aerobes Biofilmverfahren: Tropfkörper**
- **praxisgerechte Versuche im Labormaßstab**
- **Konzentrationsprofile**

Biofilmverfahren werden bei der biologischen Abwasserreinigung eingesetzt. Auf diesen Verfahren beruhen Tropfkörper.

Eine Pumpe fördert das Abwasser von der Versorgungseinheit zum oberen Ende des Tropfkörpers. Mit Hilfe eines Drehsprengers tropft das Abwasser auf den Tropfkörper herab. In dem Tropfkörper befindet sich ein Festbett aus speziellem Trägermaterial. Auf diesem Trägermaterial befindet sich eine dünne Schicht aus Mikroorganismen (Biofilm). Während das Abwasser durch das Festbett rieselt, reinigen die Mikroorganismen das Abwasser biologisch. Im oberen Bereich des Tropfkörpers erfolgt bevorzugt der Abbau organischer Stoffe. Im unteren Bereich hingegen überwiegt die Oxidation von Ammonium zu Nitrat (Nitrifikation). Anschließend gelangt das Abwasser in einen Auffangbehälter. Zwei Pumpen fördern einen Teil des gesammelten Abwassers erneut zum Drehsprenger (Rezirkulation).

Im unteren Bereich des Tropfkörpers befinden sich Öffnungen, um eine Belüftung durch natürliche Konvektion zu ermöglichen. Alternativ kann die Belüftung auch mit einem Verdichter erfolgen.

Zur Erzeugung des Biofilms wird der Tropfkörper zunächst mit dem Trägermaterial, Abwasser und Belebtschlamm gefüllt. Der aus dem Tropfkörper kontinuierlich ausgelegene Belebtschlamm sedimentiert in einem Nachklärbecken. Eine Pumpe fördert den Belebtschlamm wieder zum Tropfkörper. Die Belüftung des Tropfkörpers erfolgt mit einem Verdichter. Im Laufe der Zeit siedeln sich die im Belebtschlamm vorhandenen Mikroorganismen auf dem Trägermaterial an und erzeugen so den Biofilm.

Folgende Durchflüsse werden erfasst und können eingestellt werden: Abwasser, Rezirkulation, Belüftung (mit Verdichter). Die Drehzahl des Drehsprengers kann ebenfalls eingestellt werden. Probenahmestellen am Tropfkörper ermöglichen die Aufnahme von Konzentrationsprofilen.

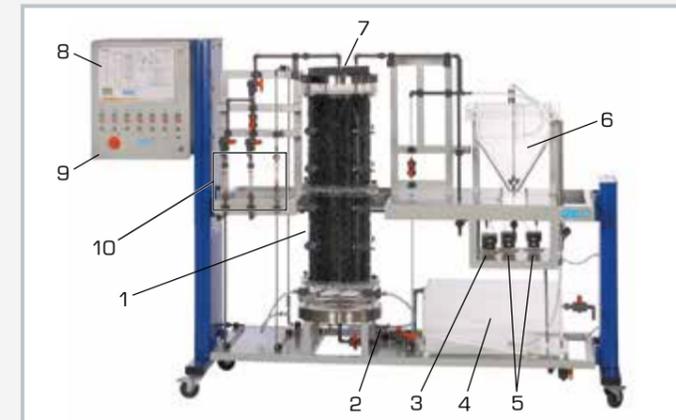
Für die Versuche ist Belebtschlamm von einer Kläranlage erforderlich. Zur Auswertung der Versuche empfehlen wir Analysetechnik zur Bestimmung folgender Parameter:

- biochemischer oder chemischer Sauerstoffbedarf
- Ammonium-Konzentration
- Nitrat-Konzentration

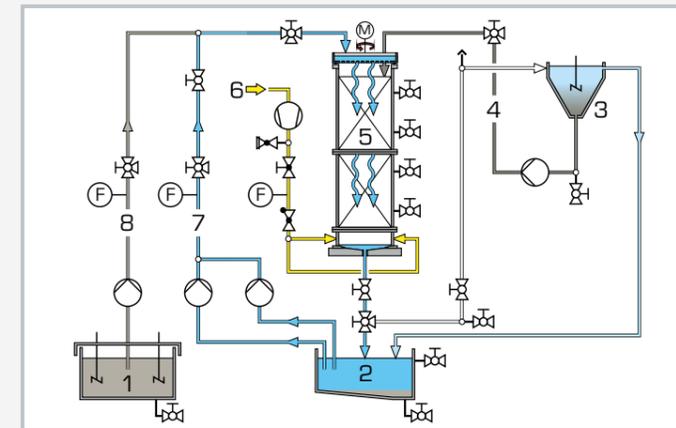
### Lerninhalte / Übungen

- Funktionsweise eines Tropfkörpers
- Aufnahme von Konzentrationsprofilen
- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- Erkennen folgender Einflussgrößen:
  - ▶ Durchfluss der Rezirkulation
  - ▶ Raumbelastung des Tropfkörpers
  - ▶ Oberflächenbelastung des Tropfkörpers
- Vergleich verschiedener Trägermaterialien

## CE 701 Biofilmverfahren



1 Tropfkörper, 2 Verdichter, 3 Rücklaufschlammpumpe, 4 Auffangbehälter, 5 Zirkulationspumpen, 6 Nachklärbecken, 7 Drehsprenger, 8 Prozessschema, 9 Schaltschrank, 10 Durchflussmesser



1 Abwasserbehälter, 2 Auffangbehälter, 3 Nachklärbecken, 4 Rücklaufschlamm, 5 Tropfkörper, 6 Luft, 7 Rezirkulation, 8 Abwasser; F Durchfluss



Trägermaterialien zur Befüllung des Tropfkörpers

### Spezifikation

- [1] aerobes Biofilmverfahren zum Abbau organischer Stoffe und zur Nitrifikation
- [2] transparenter Tropfkörper mit Drehsprenger
- [3] Drehzahl des Drehsprengers stufenlos einstellbar
- [4] Belüftung des Tropfkörpers durch natürliche Konvektion oder mit Verdichter möglich
- [5] Aufnahme von Konzentrationsprofilen möglich
- [6] Nachklärbecken mit Pumpe zur Förderung des Rücklaufschlammes
- [7] alle relevanten Durchflüsse stufenlos einstellbar
- [8] separate Versorgungseinheit mit Abwasserbehälter und 2 Rührwerken
- [9] 2 verschiedene Trägermaterialien aus HDPE

### Technische Daten

- Tropfkörper**
- Durchmesser: 340mm
  - Höhe: 1000mm
  - Volumen: 90L
- Drehsprenger**
- max. Drehzahl: 2min<sup>-1</sup>
- Behälter**
- Abwasserbehälter: 300L
  - Auffangbehälter: 90L
  - Nachklärbecken: 30L
- Fördermengen**
- Abwasserpumpe: max. 25L/h
  - Zirkulationspumpen: 2x max. 25L/h
  - Rücklaufschlammpumpe: max. 25L/h
  - Verdichter: max. 600L/h
- Trägermaterial**
- spezifische Oberfläche: 180 bzw. 300m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>
- Messbereiche**
- Durchfluss:
    - ▶ 2...25L/h (Abwasser)
    - ▶ 5...65L/h (Rezirkulation)
    - ▶ 50...900L/h (Belüftung)

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase  
120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1550x790x1150mm (Versorgungseinheit)  
LxBxH: 2870x790x1900mm (Versuchsstand)  
Gesamtgewicht: ca. 500kg

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss, Belebtschlamm, Substanzen zur Herstellung von synthetischem Abwasser

### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Versorgungseinheit
- 1 Satz Schläuche
- 1 Satz Werkzeuge
- 2 Gebinde Trägermaterial
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

**CE 704**  
SBR-Verfahren

2E

**Beschreibung**

- biologische Abwasserreinigung
- Sequencing Batch Reactor (SBR)
- Prozessregler mit Touchscreen

Das SBR-Verfahren ist ein biologisches, aerobes Abwasserreinigungsverfahren. Im Gegensatz zum klassischen Belebtschlammverfahren erfolgen die einzelnen Prozessschritte nicht kontinuierlich und räumlich voneinander getrennt, sondern chargenweise und zeitlich aufeinander folgend in einem Reaktor.

Der Reaktor ist mit einem Verdichter zur Belüftung und einem Rührwerk ausgestattet. Das Rührwerk stellt auch in den Phasen ohne Belüftung (Denitrifikation) eine ausreichende Durchmischung des Reaktorinhalts sicher. Am Ende wird das gereinigte Wasser (Klarwasser) aus dem Reaktor abgezogen und in einem Behälter gesammelt. Dies erfolgt mit einer schwimmenden Vorrichtung, wie es für das SBR-Verfahren typisch ist. Über dem Reaktor befindet sich eine Vorrichtung, um bei Bedarf eine externe Kohlenstoffquelle (z.B. Zuckerlösung) dosieren zu können.

Zeitschaltuhren für den Verdichter und das Rührwerk ermöglichen es, die Belüftungsphasen (Nitrifikation) und Mischphasen (Denitrifikation) individuell einstellen zu können.

Die Sauerstoffkonzentration, der pH-Wert und die Temperatur im Reaktor werden erfasst. Ein digitaler Prozessregler zeigt die erfassten Messwerte und die Drehzahl des Rührwerkes kontinuierlich an. Der Prozessregler verfügt über ein Touchscreen und fungiert zusätzlich als Regler für die Sauerstoffkonzentration während der Belüftungsphasen.

Für die Versuche ist aerober Belebtschlamm (z.B. von einer Kläranlage) erforderlich. Als Kohlenstoffquelle für das synthetische Abwasser kann Haushaltszucker (Saccharose) verwendet werden. Zur Auswertung der Versuche müssen folgende Parameter bestimmt werden:

- Menge organischer Stoffe
  - BSB<sub>5</sub> oder CSB oder TOC
- Stickstoffkonzentrationen
  - NH<sub>4</sub>-N: Ammonium
  - NO<sub>2</sub>-N: Nitrit
  - NO<sub>3</sub>-N: Nitrat

**Lerninhalte / Übungen**

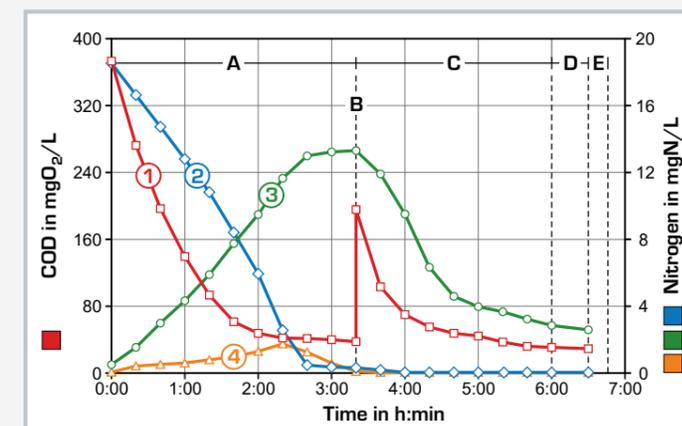
- Funktionsweise des SBR-Verfahrens
- Stickstoffelimination durch Nitrifikation und Denitrifikation
- Einfluss der Zyklusgestaltung auf das Reinigungsergebnis
- Aufnahme und Interpretation von zeitlichen Konzentrationsverläufen
- Bestimmung von Umsatzraten
- Sedimentationseigenschaften von Belebtschlamm

**CE 704**  
SBR-Verfahren

1 Bedienelemente für den Verdichter und für das Rührwerk, 2 Prozessregler, 3 Durchflussmesser (Luft), 4 pH-Wert-Aufnehmer, 5 Dosiervorrichtung, 6 Rührwerk, 7 Sauerstoffaufnehmer, 8 Belüftungsvorrichtung, 9 Schwimmer für Klarwasserabzug, 10 Ansaugball für Klarwasser



Digitaler Prozessregler  
Anzeige der Prozessgrößen (links), Bedienoberfläche für die Regelung der Sauerstoffkonzentration (rechts)



Gemessene Konzentrationsverläufe  
1 chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), 2 Ammonium (NH<sub>4</sub>-N), 3 Nitrat (NO<sub>3</sub>-N), 4 Nitrit (NO<sub>2</sub>-N)  
Prozessschritte: A Mischen mit Belüftung (Nitrifikation), B Dosierung einer Zuckerlösung (Kohlenstoffquelle), C Mischen ohne Belüftung (Denitrifikation), D Sedimentation des Belebtschlammes, E Abzug des gereinigten Wassers (Klarwasser)

**Spezifikation**

- [1] diskontinuierliches Belebtschlammverfahren
- [2] Sequencing Batch Reactor (SBR)
- [3] Rührwerk mit Zeitschaltuhr und stufenlos einstellbarer Drehzahl
- [4] Verdichter mit Zeitschaltuhr für Belüftung
- [5] schwimmende Vorrichtung zum Abzug des gereinigten Wassers
- [6] Dosiervorrichtung für externe Kohlenstoffquelle
- [7] Durchflussmesser für Belüftung
- [8] Behälter für Abwasser und gereinigtes Wasser
- [9] Erfassung von pH-Wert, Temperatur und Sauerstoffkonzentration
- [10] Prozessregler mit Touchscreen zur Anzeige von Prozessgrößen und zur Regelung der Sauerstoffkonzentration

**Technische Daten****Reaktor**

- Ø 290mm
- Höhe: 300mm
- max. Füllmenge: 18L
- Material: Plexiglas

**Behälter**

- Abwasser: 15L
- gereinigtes Wasser: 30L
- Dosiergefäß: 260 mL

Rührwerk: max. 330min<sup>-1</sup>  
Verdichter: max. 15,5L/min

**Messbereiche**

- Sauerstoffkonzentration: 0...10mg/L
- pH-Wert: 0...14
- Temperatur: 0...50°C
- Durchfluss: 50...900L/h

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 850x520x480mm  
Gewicht: ca. 30kg

**Für den Betrieb erforderlich**

aerober Belebtschlamm, Zucker, Analysetechnik

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsgerät
- 3 Gebinde pH-Kalibrierlösung (jeweils 1L)
- 1 Gebinde Kaliumchloridlösung (1L)
- 1 Gebinde Ammoniumhydrogencarbonat (250g)
- 1 Gebinde Di-Kaliumhydrogenphosphat (250g)
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht

## CE 705 Belebtschlammverfahren



## Kläranlage im Labormaßstab

Das aerobe Belebtschlammverfahren ist das in Kläranlagen weltweit am häufigsten eingesetzte biologische Verfahren. Fundierte Kenntnisse über dieses Verfahren sind für angehende Ingenieure und Facharbeiter im Bereich der Umwelttechnik daher unverzichtbar.

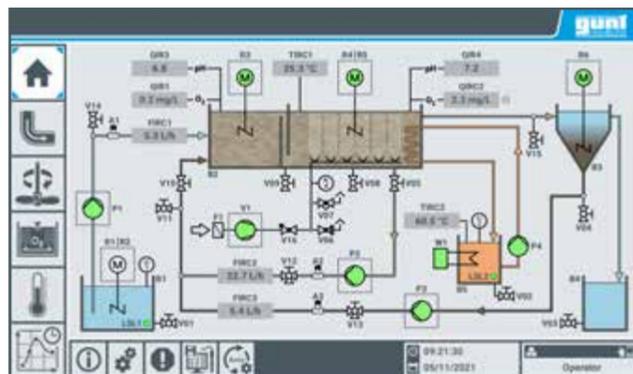
Dieses Gerät wurde von erfahrenen Ingenieuren mit dem Ziel entwickelt, die komplexen Prozesse bei diesem Verfahren im kontinuierlichen Betrieb anschaulich und praktisch erlernen zu können. Das Gerät ist für eine Kohlenstoffelimination und Stickstoffelimination konzipiert. Die Stickstoffelimination erfolgt durch Nitrifikation und vorgeschalteter Denitrifikation. Hierfür ist das Belebungsbecken in einen aeroben und einen anoxischen Bereich unterteilt.

## Lerninhalte

- Funktionsweise der Nitrifikation und vorgeschalteten Denitrifikation
- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- Erkennen typischer Einflussgrößen:
  - ▶ Schlammalter
  - ▶ Raumbelastung
  - ▶ Schlammbelastung
  - ▶ Rücklaufschlammverhältnis
  - ▶ Rücklaufverhältnis der internen Rezirkulation (Denitrifikation)
- Wirkungsgrad der vorgeschalteten Denitrifikation
- Einfluss folgender Umgebungsbedingungen auf den biologischen Abbau:
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Sauerstoffkonzentration

## Steuerung mit SPS

Die Steuerung des Versuchszustandes erfolgt über die integrierte SPS mit Touchscreen. Mittels integrierten Router kann der Versuchszustand alternativ über ein Endgerät bedient und gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Die Messwerte werden am Touchscreen angezeigt und können gleichzeitig über LAN direkt auf einem PC oder mobilen Endgerät betrachtet werden.

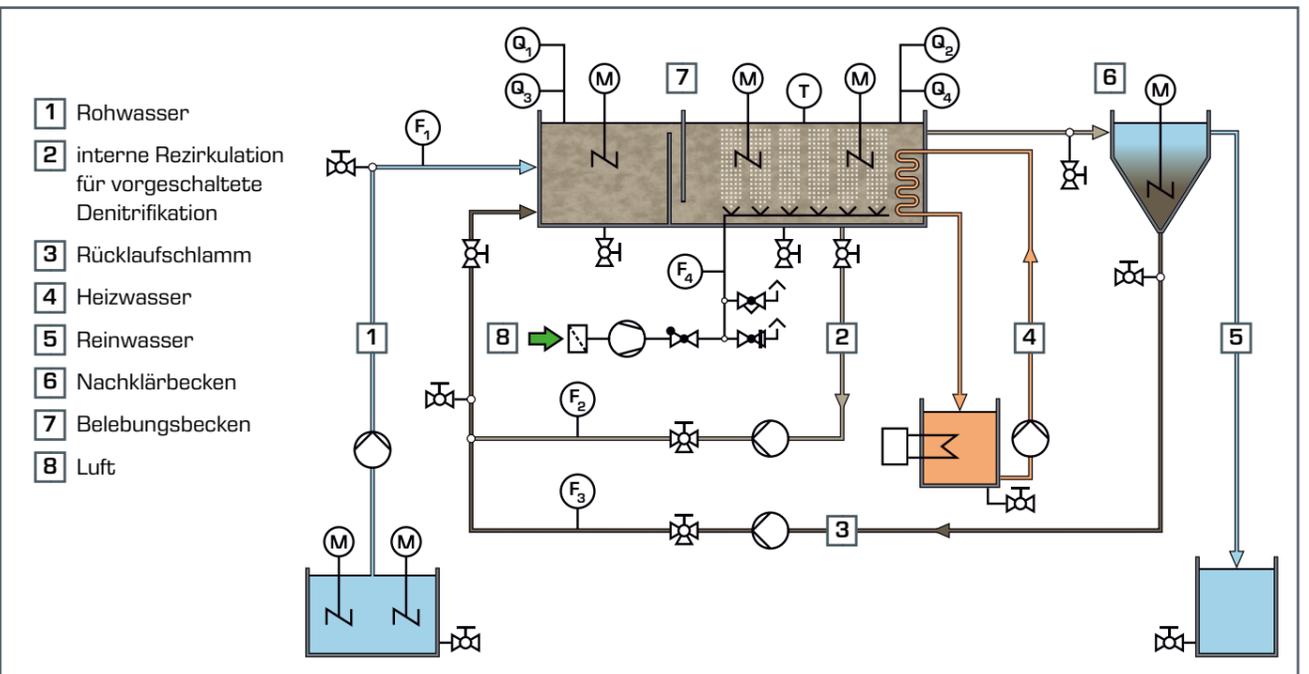


Bedienoberfläche des Touchscreen (Übersicht)

## Mess- und Regelungstechnik

Komplexe Prozesse wie das Belebtschlammverfahren sind heutzutage weitgehend automatisiert. Hierfür ist der Einsatz moderner Mess- und Regelungstechnik unverzichtbar. Dies erfordert auch von Ingenieuren im Bereich der Umwelttechnik zumindest Grundlagenkenntnisse im Umgang mit derartigen Systemen.

Um die Auszubildenden und Studenten auf diese Herausforderungen der Berufspraxis vorzubereiten, haben wir bei der Entwicklung des Gerätes auch diesen wichtigen Aspekt beachtet. Daher ist CE 705 mit umfangreicher Messtechnik sowie einer SPS mit Touchscreen ausgestattet.



- 1 Rohwasser
- 2 interne Rezirkulation für vorgeschaltete Denitrifikation
- 3 Rücklaufschlamm
- 4 Heizwasser
- 5 Reinwasser
- 6 Nachklärbecken
- 7 Belebungsbecken
- 8 Luft

## Messgrößen

			Auto
Durchfluss	F <sub>1</sub>	Rohwasser	<input checked="" type="checkbox"/>
	F <sub>2</sub>	interne Rezirkulation	<input checked="" type="checkbox"/>
	F <sub>3</sub>	Rücklaufschlamm	<input checked="" type="checkbox"/>
	F <sub>4</sub>	Belüftung	<input type="checkbox"/>
Sauerstoffkonzentration	Q <sub>1</sub>	Denitrifikationszone	<input type="checkbox"/>
	Q <sub>2</sub>	Nitrifikationszone	<input checked="" type="checkbox"/>
pH-Wert	Q <sub>3</sub>	Denitrifikationszone	<input type="checkbox"/>
	Q <sub>4</sub>	Nitrifikationszone	<input type="checkbox"/>
Temperatur	T	Nitrifikationszone	<input checked="" type="checkbox"/>

Zum Produkt:

Auto  
Regelung

## CE 705 Belebtschlammverfahren



Die Abbildung zeigt: Versuchsstand (links) und Versorgungseinheit (rechts), Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

### Beschreibung

- **aerober biologischer Abbau organischer Stoffe**
- **Nitrifikation und vorgeschaltete Denitrifikation**
- **Anlagensteuerung mit integrierter SPS**
- **integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone**

Das Belebtschlammverfahren ist das wichtigste biologische Verfahren der Wasserbehandlung. Mit CE 705 lässt sich dieses Verfahren anschaulich demonstrieren.

Eine Pumpe fördert das mit gelösten organischen Stoffen (Substrat) verunreinigte Rohwasser in das Belebungsbecken. Die im Belebungsbecken vorhandenen, aeroben Mikroorganismen (Belebtschlamm) verwenden das Substrat als Nahrungsquelle und bauen es auf diese Weise biologisch ab. Da aerobe Mikroorganismen Sauerstoff benötigen, wird das Rohwasser im Belebungsbecken belüftet. Die Durchmischung des Belebtschlammes mit dem Rohwasser erfolgt mit Rührwerken. Im Nachklärbecken wird der Belebtschlamm anschließend durch Sedimentation vom Reinwasser abgetrennt. Ein Teil des Belebtschlammes gelangt wieder in das Belebungsbecken (Rücklaufschlamm). Das Reinwasser wird in einem Behälter gesammelt.

Die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat (Nitrifikation) und von Nitrat zu Stickstoff (Denitrifikation) ist auch möglich. Durch eine Trennwand kann im Belebungsbecken ein unbelüfteter Bereich für die Denitrifikation eingerichtet werden.

Die Steuerung des Versuchsstandes erfolgt über die integrierte SPS mit Touchscreen. Mittels integrierten Router kann der Versuchsstand alternativ über ein Endgerät bedient und gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten via WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit dem kundeneigenen Netzwerk möglich.

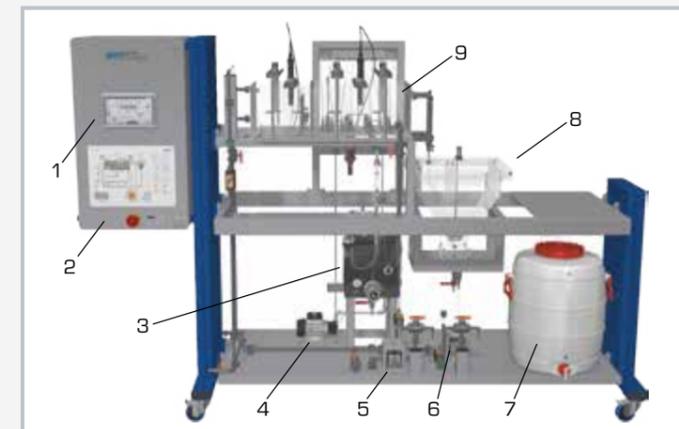
Für die Versuche ist Belebtschlamm von einer Kläranlage und Analysetechnik erforderlich. Zur Auswertung der Versuche müssen folgende Parameter bestimmt werden:

- Organische Stoffe BSB<sub>5</sub> oder CSB oder TOC
- Stickstoffkonzentrationen Ammonium, Nitrit und Nitrat

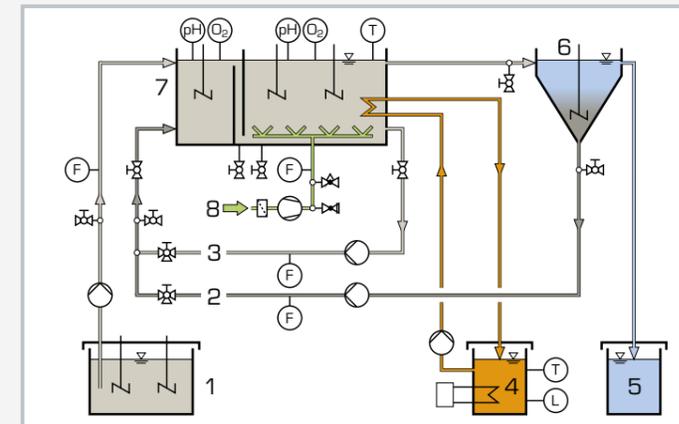
### Lerninhalte / Übungen

- Belebtschlammverfahren kennenlernen
- Funktionsweise der Nitrifikation und vorgeschalteten Denitrifikation
- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- folgende Einflussgrößen erkennen
  - ▶ Rücklaufschlammverhältnis
  - ▶ Rücklaufverhältnis der internen Rezirkulation
  - ▶ Schlammalter
  - ▶ Schlammbelastung
  - ▶ Raumbelastung
  - ▶ Sauerstoffkonzentration und Temperatur
- Wirkungsgrad der vorgeschalteten Denitrifikation
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

## CE 705 Belebtschlammverfahren



1 SPS mit Touchscreen, 2 Schaltschrank, 3 Heizwasserbehälter, 4 Heizwasserpumpe, 5 Zirkulationspumpe, 6 Rücklaufschlammpumpe, 7 Reinwasserbehälter, 8 Nachklärbecken, 9 Belebungsbecken



1 Rohwasser, 2 Rücklaufschlamm, 3 interne Rezirkulation für vorgeschaltete Denitrifikation, 4 Heizwasser, 5 Reinwasser, 6 Nachklärbecken, 7 Belebungsbecken, 8 Luft; F Durchfluss, L Füllstand, O<sub>2</sub> Sauerstoffkonzentration, T Temperatur



Belebungsbecken:  
1 Denitrifikationszone (unbelüftet), 2 Nitrifikationszone (belüftet), 3 Sauerstoffaufnehmer, 4 pH-Wert Aufnehmer, 5 Rührwerk

### Spezifikation

- [1] Belebungsbecken, in zwei Bereiche unterteilt
- [2] Nachklärbecken mit Schlammräumer
- [3] Nitrifikation und vorgeschaltete Denitrifikation
- [4] separate Versorgungseinheit mit 2 Rührwerken
- [5] Regelung und Erfassung von Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Durchfluss
- [6] Erfassung von pH-Wert im Belebungsbecken
- [7] magnetisch-induktive Durchflussaufnehmer
- [8] Steuerung des Versuchsstandes mit einer SPS über Touchscreen
- [9] integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an bis zu 5 Endgeräten
- [10] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk

### Technische Daten

- SPS: Eaton XV-303  
Behälter
- Belebungsbecken (Nitrifikationszone): ca. 34L
  - Belebungsbecken (Denitrifikationszone): ca. 17L
  - Nachklärbecken: 30L
  - Rohwasserbehälter: 200L
  - Reinwasserbehälter: 80L
- Fördermengen
- Rohwasserpumpe: max. 34L/h
  - Rücklaufschlammpumpe: max. 34L/h
  - Zirkulationspumpe: max. 34L/h
- Drehzahlen (Rührwerke)
- Rohwasserbehälter: je max 600min<sup>-1</sup>
  - Belebungsbecken: je max 330min<sup>-1</sup>
  - Nachklärbecken: max 45min<sup>-1</sup>

### Messbereiche

- Durchfluss:
  - ▶ 0,6...30L/h (Rohwasser und Rücklaufschlamm)
  - ▶ 3...60L/h (interne Rezirkulation)
  - ▶ 50...550L/h (Druckluft)
- Temperatur: 0...50°C
- pH-Wert: 0...14
- Sauerstoffkonzentration: 0...20mg/L

230V, 50Hz, 1 Phase  
230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase  
UL/CSA optional  
LxBxH: 1550x790x1150mm (Versorgungseinheit)  
LxBxH: 2830x790x1900mm (Versuchsstand)  
Gesamtgewicht: ca. 450kg

### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss, Belebtschlamm, Analysetechnik

### Lieferumfang

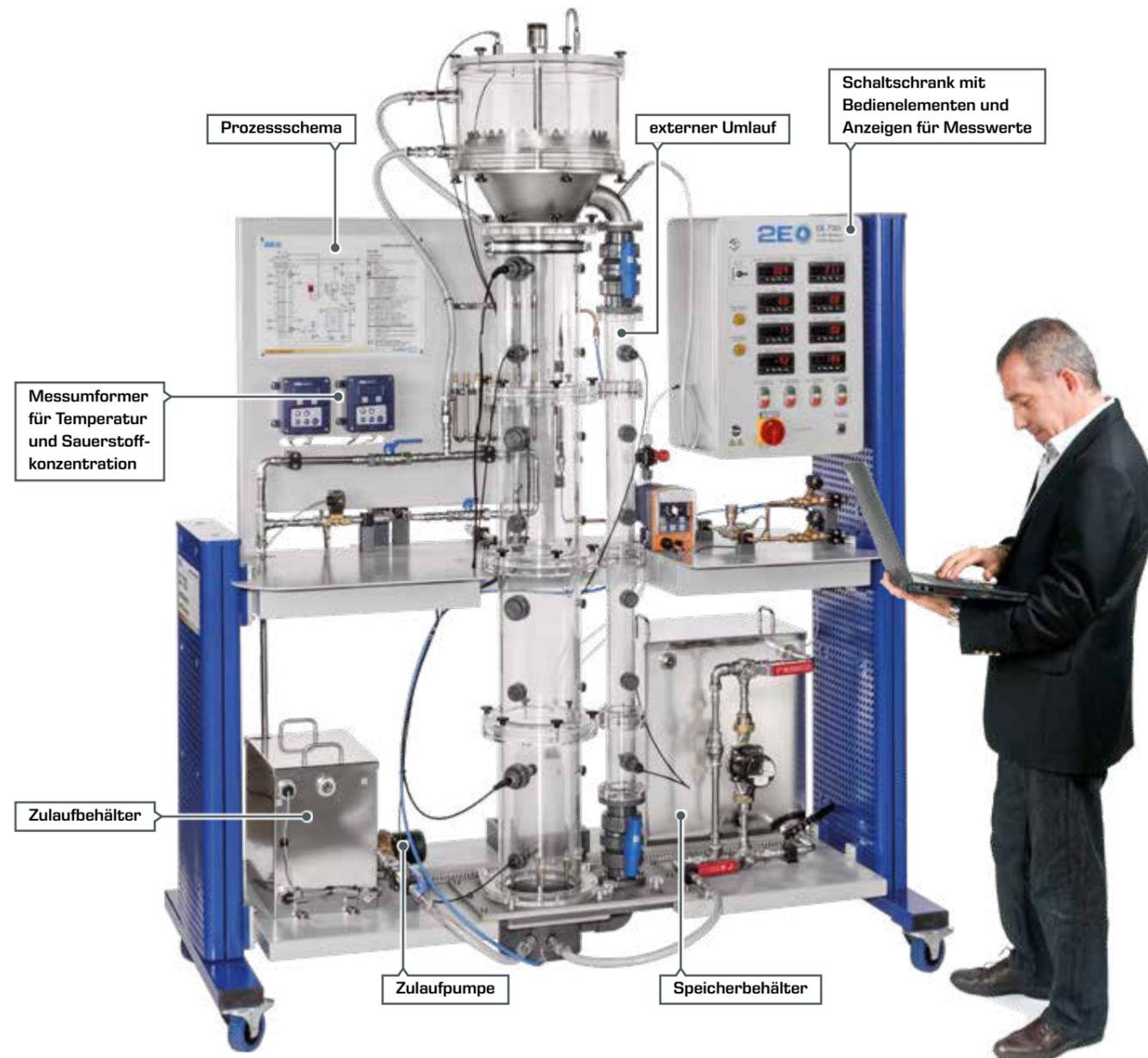
Versuchsstand, Versorgungseinheit, pH-Kalibrierlösungen, Kaliumchloridlösung, Di-Kaliumhydrogenphosphat, Ammoniumhydrogencarbonat, Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht CE 730 Airlift-Reaktor

### Leistungsstarke Bioreaktoren

Für die Leistungsfähigkeit eines aeroben Bioreaktors ist die Versorgung der Mikroorganismen (Biomasse) mit Sauerstoff von entscheidender Bedeutung. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die gleichmäßige Durchmischung des Reaktorinhalts dar. Diese beiden Anforderungen erfüllen Airlift-Reaktoren im besonderen Maße.

Bei einem Airlift-Reaktor erfolgt die Durchmischung ausschließlich durch die ohnehin erforderliche Belüftung. Mechanisch bewegliche Teile (z.B. Rührwerke) sind also nicht erforderlich. Der für einen effektiven Betrieb erforderliche Rückhalt der Biomasse im Reaktor wird durch einen Umlauf erreicht. Airlift-Reaktoren werden in der Biotechnologie und bei der biologischen Abwasserreinigung eingesetzt.

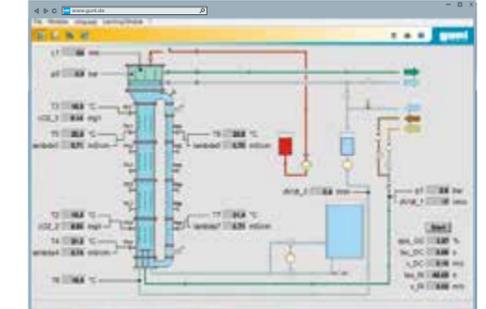


### Airlift-Reaktor CE 730

Der didaktische Schwerpunkt liegt in der Funktionsweise und Betriebsweise eines Airlift-Reaktors. Hierzu gehören vor allem das Lösen von Sauerstoff in der flüssigen Phase (Wasser) und die Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Reaktor.

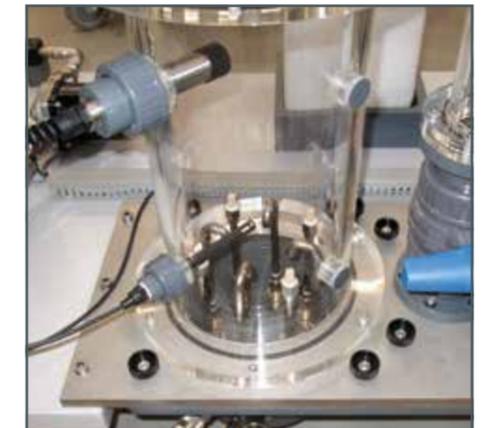
Kernstück des Versuchsstands ist ein Airlift-Reaktor mit externem Umlauf. Zur Belüftung des Reaktors stehen Ihnen mehrere verschiedene Verteiler zur Verfügung. Somit können Sie den Einfluss der Blasengröße auf den Stoffübergang untersuchen. An dem Umlauf befinden sich in definiertem Abstand zwei Messstellen für Leitfähigkeit. Durch Zugabe einer Salzlösung kommt es an beiden Messstellen zeitlich versetzt zu einem sprunghaften Anstieg (Peak) der Leitfähigkeit. Aus der Zeit zwischen beiden Peaks und dem Abstand der Messstellen kann die Strömungsgeschwindigkeit im Reaktor bestimmt werden.

Airlift-Reaktor während eines Testbetriebes



### Software

Die übersichtliche Software von CE 730 zeigt die Werte aller wesentlichen Prozessgrößen kontinuierlich an. Selbstverständlich können Sie die Messwerte für die Auswertung speichern.



Verschiedene Verteiler für die Belüftung des Reaktors

### Lerninhalte

- Einfluss der Gasleerrohrgeschwindigkeit auf:
  - ▶ Gasgehalt
  - ▶ Stoffübergangskoeffizient
  - ▶ Mischzeit
  - ▶ Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit

Zum Produkt:



**CE 730**  
Airlift-Reaktor**Lerninhalte / Übungen**

- Einfluss der Gasleerrohrgeschwindigkeit auf:
  - ▶ Gasgehalt
  - ▶ Stoffübergangskoeffizient
  - ▶ Mischzeit
  - ▶ Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit

**Beschreibung**

- **aerober Submersreaktor**
- **externer Umlauf**
- **Untersuchung charakteristischer Eigenschaften**

Airlift-Reaktoren sind Submersreaktoren, bei denen der Energieeintrag durch Begasung erfolgt. Für die Begasung wird häufig Druckluft verwendet.

Im Betrieb tritt Druckluft von unten durch den Gasverteiler in den Airlift-Reaktor ein. Die zugeführte Luft durchmischt den Reaktorinhalt und steigt in Form von Luftblasen auf. Die aufsteigenden Luftblasen bewirken eine aufwärtsgerichtete Strömung. Dabei löst sich ein Teil des Sauerstoffs der Luft im Wasser. Der Bereich mit aufwärtsgerichteter Strömung wird Riser genannt. Am Kopf des Reaktors verlassen die verbleibenden Luftblasen das Wasser.

Die gasfreie Flüssigkeit wird parallel zum Riser wieder zum unteren Bereich des Reaktors zurückgeführt. Der Bereich mit abwärtsgerichteter Strömung eines Airlift-Reaktors wird Downcomer genannt. Im Betrieb wird der Reaktorinhalt durch den Riser und den Downcomer umgewälzt. Dieser Umlauf wird im kontinuierlichen Betrieb von einer Durchströmung überlagert. Hierfür ist ein zusätzlicher Behälter mit Zulaufpumpe vorhanden. Die Einstellung der Geschwindigkeit des Umlaufs erfolgt über den Durchfluss der Luft.

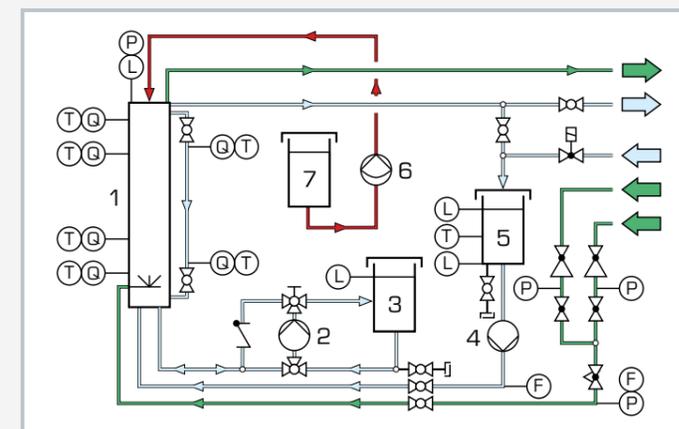
Der Versuchsstand CE 730 ist für die Untersuchung charakteristischer Eigenschaften eines Airlift-Reaktors mit Luft, Stickstoff und Wasser ausgelegt. Durch die Begasung mit Luft steigt der Sauerstoffgehalt im Wasser. Mit Hilfe von Stickstoff ist es möglich, den Sauerstoffgehalt im Wasser zu senken.

Dies ist die Voraussetzung zur Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten für Sauerstoff in Wasser. Die Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit wird durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Für die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit ist eine Dosierpumpe und ein Behälter für Salzlösung vorhanden. Die Mischzeit wird mit einem Indikator ermittelt. Der Gasgehalt wird mit dem Füllstand im Airlift-Reaktor bestimmt.

Die Messwerte werden am Schaltschrank digital angezeigt und können gleichzeitig über USB direkt auf einen PC übertragen und dort mit Hilfe der mitgelieferten Software ausgewertet werden.

**CE 730**  
Airlift-Reaktor

1 Airlift-Reaktor mit externem Umlauf, 2 Zulaufpumpe, 3 Zulaufbehälter, 4 Umrölpumpe, 5 Speicherbehälter, 6 Dosierpumpe



1 Airlift-Reaktor mit externem Umlauf, 2 Umrölpumpe, 3 Speicherbehälter, 4 Zulaufpumpe, 5 Zulaufbehälter, 6 Dosierpumpe, 7 Tracerbehälter; F Durchfluss, L Füllstand, P Druck, Q Analyse, T Temperatur; blau: Wasser, grün: Gas, rot: Tracer

**Spezifikation**

- [1] Bestimmung wichtiger Kenngrößen am Airlift-Reaktor
- [2] transparenter Airlift-Reaktor mit äußerem Umlauf
- [3] Druckluft zur Erzeugung von Luftblasen zur Umwälzung des Reaktorinhaltes
- [4] Einstellung der Gasleerrohrgeschwindigkeit
- [5] Stickstoff zur Entfernung des Sauerstoffs aus dem Reaktorinhalt
- [6] Bestimmung der Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit über die Leitfähigkeit
- [7] Bestimmung der Mischzeit mit Indikator und Farbumschlag-Methode
- [8] Aufnehmer zur Erfassung von Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Druck und Durchfluss
- [9] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows

**Technische Daten**

Airlift-Reaktor

- Riser: Ø 180mm
- Downcomer: Ø 60mm
- Höhe: 2000mm

Messbereiche

- Leitfähigkeit: 4x 0...100mS/cm
- Sauerstoffkonzentration: 2x 0...10mg/L
- Druck: 0...3bar
- Durchfluss:
  - ▶ 0,06...3m<sup>3</sup>/h [Wasser]
  - ▶ 1...10m<sup>3</sup>/h [Gas]

230V, 50Hz, 1 Phase

230V, 60Hz, 1 Phase; 120V, 60Hz, 1 Phase

UL/CSA optional

LxBxH: 1850x790x2450mm

Gewicht: ca. 300kg

**Für den Betrieb erforderlich**

Druckluft (>8m<sup>3</sup>/h), Stickstoff-Gasflasche mit Druckminderventil, Kaltwasseranschluss (>400L/h), Abfluss  
PC mit Windows empfohlen

**Lieferumfang**

- 1 Versuchsstand
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz Zubehör
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Übersicht CE 702 Anaerobe Wasserbehandlung



Anaerobe Verfahren werden schwerpunktmäßig für Abwässer eingesetzt, die sehr stark mit organischen Stoffen belastet sind, wie sie z. B. in der Lebensmittelindustrie anfallen.

Bei unserem Lehrgerät CE 702 stehen Ihnen zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zum einen das anaerobe Belebtschlammverfahren und das UASB-Verfahren. Sie können beide Verfahren separat (1-stufig) oder in Reihe geschaltet (2-stufig) betreiben. Somit stehen Ihnen insgesamt drei verschiedene Betriebsweisen zur Verfügung. Das Gerät ist zudem mit umfangreicher Mess- und Regelungstechnik und Software ausgestattet.

Selbstverständlich erhalten Sie auch zu diesem Gerät umfangreiches didaktisches Begleitmaterial, das Sie schnell mit der Bedienung des Gerätes vertraut macht. Zudem werden die theoretischen Grundlagen der anaeroben Abwasserreinigung ausführlich und anschaulich dargestellt.

Die 2-stufige Betriebsweise ermöglicht es Ihnen, den pH-Wert und die Temperatur in beiden Stufen unabhängig voneinander regeln zu können. Diese Art der Prozessführung hat sich in der Praxis bewährt und bietet den Vorteil, die Umgebungsbedingungen besser an die Anforderungen der jeweiligen Abbauschritte anpassen zu können. Das Gerät ist mit Gassammelleitungen ausgestattet, wodurch Sie zur Analyse Gasproben aus dem System entnehmen können.

**Betriebsweise 1  
(1-stufig)**



**Betriebsweise 2  
(1-stufig)**



**Betriebsweise 3  
(2-stufig)**



Rührreaktor



Nachklärbecken



UASB-Reaktor

} anaerobes  
Belebtschlammverfahren

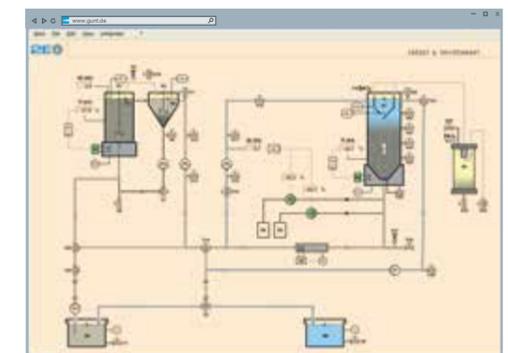
Zum Produkt:



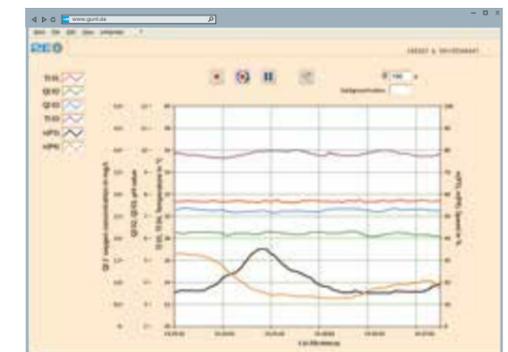
UASB-Reaktor von CE 702 während des erfolgreichen Probebetriebes in unserem Labor

### Software

Die Software von CE 702 zeigt die Temperaturen und die pH-Werte in beiden Reaktoren kontinuierlich an. Dies gibt Ihnen jederzeit einen schnellen Überblick über die Bedingungen in den Reaktoren. Zur Auswertung können Sie die Messwerte speichern. Dies entlastet Sie von Routinearbeiten und unterstützt Sie so bei der Durchführung der Versuche.



Prozessschema mit Anzeige der Messwerte



Anzeige der Messwerte als Zeitverlauf

### Lerninhalte

- Einfluss von Temperatur und pH-Wert auf den anaeroben Abbau
- Funktionsweise eines UASB-Reaktors
- Vergleich von 1-stufiger und 2-stufiger Betriebsweise
- Beobachtung und Optimierung der Betriebsbedingungen
- Erkennen typischer Einflussgrößen
  - ▶ Schlammbelastung
  - ▶ Raumbelastung
  - ▶ Strömungsgeschwindigkeit im UASB-Reaktor

## CE 702

### Anaerobe Wasserbehandlung



Die Abbildung zeigt: Versorgungseinheit (links) und Versuchsstand (rechts)

#### Beschreibung

- anaerober Abbau organischer Stoffe in Rührbehälter und UASB-Reaktor
- drei verschiedene Betriebsweisen

CE 702 demonstriert die biologische, anaerobe Wasserbehandlung. Der Versuchsstand besteht grundsätzlich aus zwei Einheiten:

- Rührbehälter mit Nachklärbecken
- UASB-Reaktor

Beide Einheiten können separat oder kombiniert eingesetzt werden. Dadurch ist sowohl eine einstufige als auch ein zweistufige Betriebsweise möglich. Beim zweistufigen Betrieb fördert eine Pumpe das Rohwasser zunächst in einen Rührbehälter. In diesem Behälter findet die Versäuerung der im Rohwasser gelösten organischen Stoffe statt. Dabei wandeln anaerobe Mikroorganismen langkettige organische Stoffe zu kurzkettigen organischen Stoffen um. In einem Nachklärbecken wird die aus dem Rührbehälter ausgetragene Biomasse vom Wasser getrennt. Die abgetrennte Biomasse wird zurück in den Rührbehälter gepumpt.

Vom Nachklärbecken gelangt das so vorbehandelte Rohwasser in einen UASB-Reaktor (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Hier findet der letzte Schritt des anaeroben Abbaus statt.

Dabei werden die zuvor gebildeten kurzkettigen organischen Stoffe durch spezielle Mikroorganismen zu Biogas (Methan und Kohlendioxid) umgewandelt. Der UASB-Reaktor wird von unten nach oben durchströmt. Im oberen Bereich des UASB-Reaktors befindet sich ein Trennsystem. Dadurch wird das gebildete Gas vom Reinwasser getrennt. Zusätzlich wird gewährleistet, dass die Biomasse im Reaktor verbleibt. Das Gas kann extern abgeleitet oder gesammelt werden. Das Reinwasser tritt am oberen Ende des Reaktors aus und wird in einem Behälter gesammelt.

Zur Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit im UASB-Reaktor kann ein Teilstrom des Reinwassers rezirkuliert werden. Die Temperaturen im Rührbehälter und UASB-Reaktor können geregelt werden. Der pH-Wert im Rührbehälter wird erfasst. Zusätzlich kann der pH-Wert im UASB-Reaktor geregelt werden. Für die Datenerfassung und zur visuellen Kontrolle steht eine Software und eine Webcam zur Verfügung.

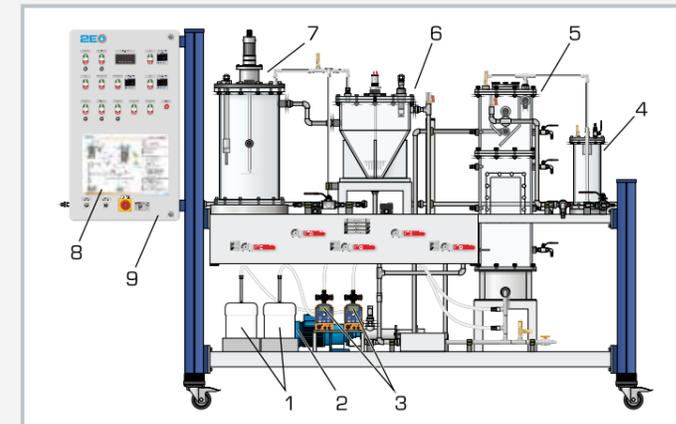
Zur Durchführung der Versuche ist anaerobe Biomasse und Analysetechnik erforderlich. Empfohlene Parameter sind: CSB (chemischer Sauerstoffbedarf), Stickstoff und Phosphor.

#### Lerninhalte / Übungen

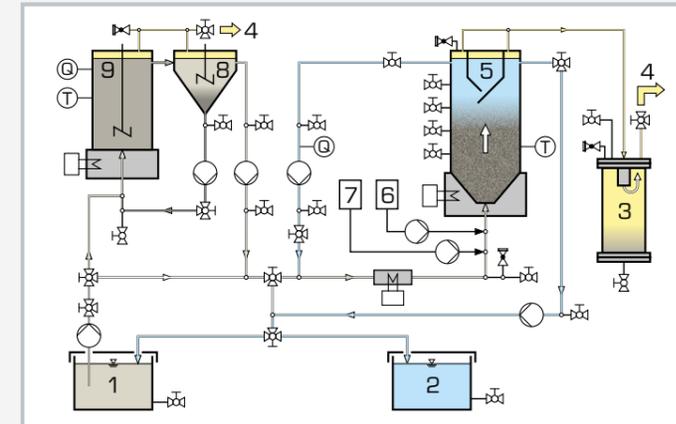
- anaerobe Wasserbehandlung kennenlernen
- Einfluss von Temperatur und pH-Wert auf den anaeroben Abbau
- Funktionsweise eines UASB-Reaktors
- Vergleich von einstufiger und zweistufiger Betriebsweise
- Beobachtung und Optimierung der Betriebsbedingungen
- folgende Einflussfaktoren erkennen
  - ▶ Schlammbelastung
  - ▶ Raumbelastung
  - ▶ Strömungsgeschwindigkeit im UASB-Reaktor

## CE 702

### Anaerobe Wasserbehandlung



1 Chemikalienbehälter, 2 Zirkulationspumpe, 3 Dosierpumpen, 4 Schaumabscheider, 5 UASB-Reaktor, 6 Nachklärbecken, 7 Rührbehälter, 8 Prozessschema, 9 Schaltschrank



1 Rohwasser, 2 Reinwasser, 3 Schaumabscheider, 4 Gas, 5 UASB-Reaktor, 6 Säure, 7 Lauge, 8 Nachklärbecken, 9 Rührbehälter; T Temperatur, Q pH Wert



UASB-Reaktor im Versuchsbetrieb

#### Spezifikation

- [1] anaerober Abbau organischer Stoffe
- [2] Rührbehälter mit Nachklärbecken
- [3] UASB-Reaktor mit Trennsystem
- [4] separate Versorgungseinheit mit Behälter für Rohwasser und Reinwasser
- [5] einstufige oder zweistufige Betriebsweise
- [6] Temperaturen im Rührbehälter und UASB-Reaktor regelbar
- [7] Regelung des pH-Werts im UASB-Reaktor
- [8] GUNT-Software zur Datenerfassung über USB unter Windows 8.1, 10
- [9] visuelle Kontrolle mit Webcam

#### Technische Daten

##### Behälter

- Rührbehälter: 30L
- Nachklärbecken: 30L
- UASB-Reaktor: 50L
- Rohwasserbehälter: 180L
- Reinwasserbehälter: 180L

##### Fördermengen (max.)

- Rohwasserpumpe: 10L/h
- Rücklaufschlammpumpe: 10L/h
- Zirkulationspumpe: 100L/h
- Dosierpumpen: 2x 2,1L/h

##### Messbereiche

- pH-Wert: 0...14
- Temperatur: 0...100°C

400V, 50Hz, 3 Phasen  
400V, 60Hz, 3 Phasen  
230V, 60Hz, 3 Phasen

UL/CSA optional

LxBxH: 1550x790x1150mm (Versorgungseinheit)

LxBxH: 2830x790x1900mm (Versuchsstand)

Gesamtgewicht: ca. 520kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Wasseranschluss, Abfluss, Klärschlamm, Pellets aus einem UASB-Reaktor, Substanzen zur Herstellung von synthetischem Abwasser, Natronlauge, Salzsäure, pH-Kalibrierlösungen, Kaliumchloridlösung  
PC mit Windows empfohlen

#### Lieferumfang

- 1 Versuchsstand
- 1 Versorgungseinheit
- 1 Satz Zubehör
- 1 GUNT-Software + USB-Kabel
- 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

## Basiswissen Bioethanol

Der Verbrauch der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Die notwendigen Fördermengen zur Deckung des Energiebedarfs führen zum immer schnelleren Erschöpfen von Lagerstätten. Neu ermittelte Vorkommen sind aufgrund der Lage und häufigen Verunreinigungen nur schwer abbaubar. Es sind also Alternativen gefragt.

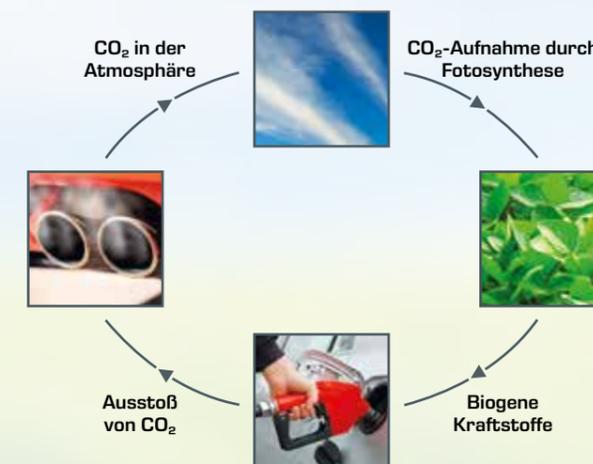
Für die Realisierung einer klimaneutralen und erneuerbaren Energieversorgung spielen, neben den un stetigen Energieträgern, wie Wind und Sonne, auch lagerfähige klimaneutral hergestellte Energieträger aus nachwachsender Biomasse eine wichtige Rolle.

Um die biogenen Energierohstoffe in einen lagerfähigen Energieträger umzuwandeln, werden unterschiedliche biologische und thermische Verfahren eingesetzt.



### Der CO<sub>2</sub>-Kreislauf des Bioethanols

Mit Hilfe des Sonnenlichts ermöglicht die Fotosynthese das Pflanzenwachstum. Dabei werden CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, sowie Wasser und anorganische Stoffe von der Pflanze aufgenommen und in energiereichere, organische Verbindungen umgesetzt. Diese Biomasse kann als Produkt eines biochemischen Prozesses betrachtet werden, bei dem ein Teil des absorbierten Sonnenlichts in Form von chemischer Energie gespeichert wird. Um die Biomasse als Energieträger in verschiedenen technischen Prozessen nutzen zu können, sind spezielle Aufbereitungsmethoden erforderlich. Dazu gehören einfache physikalische, aber auch aufwendigere thermochemische und biologische Verfahren.



### Biokraftstoffe für klimaneutrale Energie

Neben den einfachen mechanischen Verfahren für die Herstellung von festen Energieträgern (Pellets) wie Zerkleinerung und Pressagglomeration, werden für die Herstellung von Biokraftstoffen und Biogas komplexe biologische Verfahren eingesetzt.

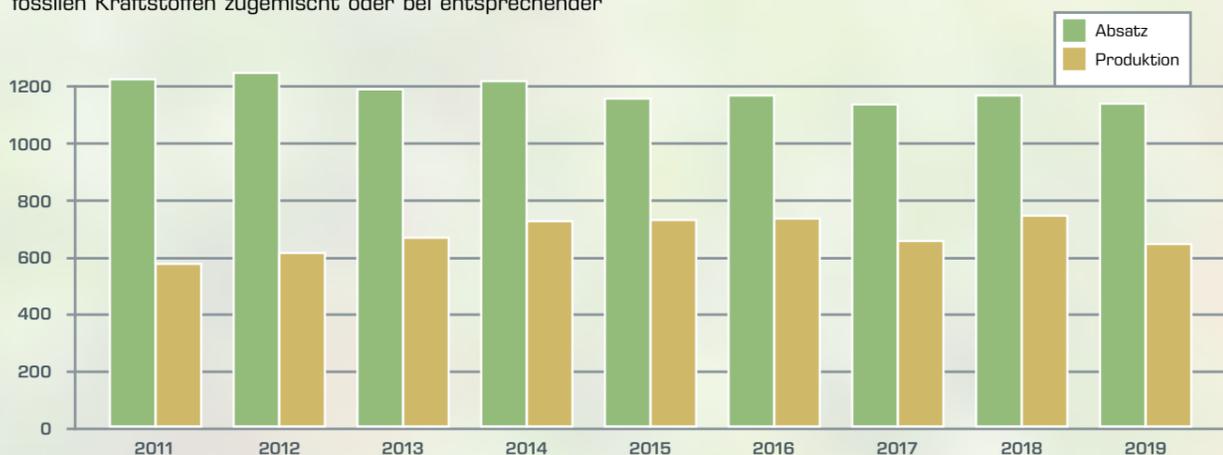
Diese Verfahren sind Anwendungen von natürlichen Prozessen aus der Natur im industriellen Maßstab. Bei diesen Prozessen spielen Faktoren wie Temperatur, pH-Wert, Durchmischung und Verweilzeit eine wichtige Rolle, um die größte Ausbeute an Energieträger aus der Biomasse zu erzielen.

Bei Biokraftstoffen handelt es sich um Ersatzstoffe für Superkraftstoffe und Dieselmotoren, die entweder den fossilen Kraftstoffen zugemischt oder bei entsprechender

Motorentechnik direkt eingesetzt werden. Die Grundlage für die Biokraftstoffe ist bei Superkraftstoff Ethanol und bei Dieselmotoren Pflanzenöl.

Für den Bereich der Biokraftstoffe bieten wir Ihnen sowohl eine Anlage für die Umwandlung von Stärke in Ethanol mittels Enzymen und Hefen, als auch eine weitere Anlage für die klassische Herstellung von Biodiesel aus Pflanzenölen durch Umesterung an.

Unsere Bioethanolanlage enthält neben der Destillationseinheit zur Trennung des Ethanols aus dem Gärrest auch die zuvor erforderlichen Maische- und Gärbehälter für den vollständigen Herstellungsprozess.



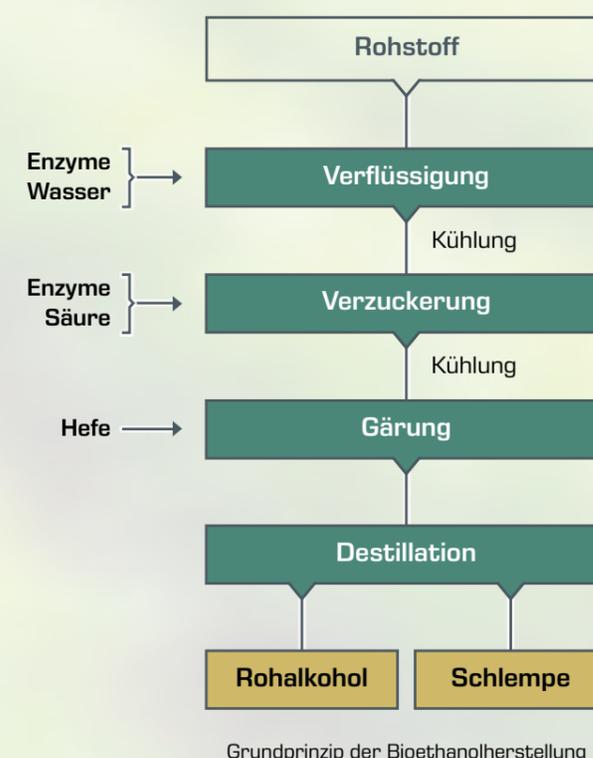
Bioethanolentwicklung in Deutschland (in 1.000 t)

(Quelle: BDBe/FNR)

Ausgangsstoff für Bioethanol sind die in Pflanzen enthaltenen Kohlenhydrate (Zucker), aus denen mit Hilfe von Enzymen und Hefepilzen Alkohol entsteht. Während zuckerhaltige Pflanzen direkt vergoren werden, geht bei stärkehaltigen Pflanzen der eigentlichen alkoholischen Gärung zunächst der enzymatische Aufschluss des Pflanzenmaterials voraus.



Der Gärprozess ist dann abgeschlossen, wenn entweder der Zucker verbraucht oder eine maximale Alkoholkonzentration erreicht ist. Das entstehende Bioethanol wird durch Destillation abgetrennt. Das Produkt der Destillation wird als Rohalkohol bezeichnet.



Grundprinzip der Bioethanolherstellung

## Übersicht

## CE 640 Biotechnische Herstellung von Ethanol

## Von der Pflanze zum Biokraftstoff

Mit dem Versuchstand CE 640 können Sie den vollständigen Prozess zur Herstellung von Ethanol im Labormaßstab durchführen. Ethanol wird als Ausgangsstoff für Biokraftstoffe und viele andere Produkte aus stärke- und zuckerhaltigen Rohstoffen hergestellt. Bei der Umwandlung von Stärke in Ethanol müssen unterschiedliche Umwandlungsprozesse mit Hilfe von Enzymen und Hefepilzen durchgeführt werden.

Die Stärke wird mit den Enzymen Gluco-Amylase und Alpha-Amylase im ersten Tank in Zucker umgewandelt. Dieser Prozess erfolgt unter Überwachung und Regelung der Temperatur und des pH-Wertes.

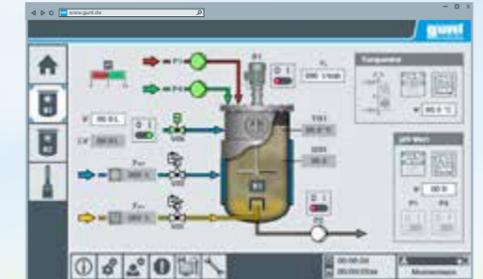
Nach dem Umpumpen in den zweiten Tank und der Zugabe von Hefepilzen findet unter Abschluss der Atmosphäre der Gärprozess statt. Dabei wandelt die Hefe den Zucker in Ethanol und Kohlenstoffdioxid um. Das Kohlenstoffdioxid entweicht über einen Gärverschluss in die Umwelt. Die Temperatur in dem Gär-tank wird dabei überwacht und geregelt.

Nach Abschluss des Gärprozesses wird das Ethanol mit Hilfe einer Destillationsanlage (Brennerei) von den Reststoffen getrennt.



- |   |                                   |             |
|---|-----------------------------------|-------------|
| 1 | Rührwerke                         |             |
| 2 | Maischebehälter                   |             |
| 3 | Gärbehälter                       |             |
| 4 | Destillierblase                   | } Brennerei |
| 5 | Kolonne                           |             |
| 6 | Dephlegmator                      |             |
| 7 | SPS mit Touchpanel                |             |
| 8 | Dosierpumpen für Säure bzw. Lauge |             |

Starkwandige, hochglanzpolierte und gehämmerte Destillierblase aus reinem Kupfer.



## Anlagensteuerung und Datenerfassung über SPS

Die Versuchsanlage wird über Touchscreen von einer SPS gesteuert. Die SPS ermöglicht die Erfassung der wichtigsten Größen auf dem internen Speicher:

- |                             |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| ■ Temperatur                | } Maischebehälter |
| ■ pH-Wert                   |                   |
| ■ Gärtemperatur             | } Gärbehälter     |
| ■ Wassertemperatur          |                   |
| ■ Kesseltemperatur          | } Brennerei       |
| ■ Glockenböden-temperaturen |                   |
| ■ Dephlegmator-temperatur   |                   |
| ■ Kondensat-temperatur      |                   |

## Lerninhalte

- Verkleisterung durch Dampf-injektion
- Verflüssigung unter Einsatz von Alpha-Amylase
- Verzuckerung unter Einsatz von Gluco-Amylase
- Gärung: Umsatz von Zucker zu Ethanol durch Hefekulturen unter anaeroben Verhältnissen
- Destillation: Abtrennung von Ethanol aus der Maische

Zum Produkt:



## CE 640

### Biotechnische Herstellung von Ethanol



Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

#### Beschreibung

- praxisnaher Prozess der Ethanolherstellung aus stärkehaltigen Bio-rohstoffen
- Anlagensteuerung mit einer SPS über Touchscreen
- integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone

Neben seiner großen Bedeutung für die chemische- und Lebensmittelindustrie wird Ethanol (Alkohol) zunehmend als Brennstoff eingesetzt. Mit CE 640 kann die realitätsnahe Herstellung von Ethanol aus stärkehaltigen Rohstoffen, wie z.B. Kartoffeln, untersucht werden. Die Versuchsanlage besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Maischebehälter, einem Gärbehälter und einer Destillationseinheit.

Eine Mischung aus Wasser, mechanisch vorzerkleinerten Kartoffeln und Alpha-Amylase (Enzyme) wird in den Maischebehälter gefüllt. Um die dicht gepackten Stärkeketten der Kartoffeln zu lösen, wird mit einer Düse Heizdampf in die Mischung injiziert (Verkleisterung). Dabei erhöht sich der Strömungswiderstand der Maische, was den weiteren Prozess behindern würde. Die Alpha-Amylase senkt durch Spaltung der Stärkeketten (Verflüssigung) den Strömungswiderstand. Zur Umsetzung der Stärke in Zucker (Verzuckerung) wird Gluco-Amylase eingesetzt. Diese Enzyme

benötigen niedrigere Temperaturen und pH-Werte. Die Temperatur wird über die mantelseitige Wasserkühlung des Maischebehälters, die Einstellung des pH-Wertes durch Säure- und Laugezufuhr erreicht. Nach der Verzuckerung wird die Maische in den Gärbehälter gepumpt. Dort entsteht durch den Gärprozess Ethanol. Eine Wasserkühlung regelt die Temperatur. Im Anschluss an den Gärprozess wird die Maische in den Sumpf der Destillationseinheit gepumpt. Zur Abtrennung des Ethanols verfügt sie über eine Glockenbodenkolonne. Für das abgetrennte Ethanol und die zurückbleibende Schlempe stehen zwei Behälter zur Verfügung.

Die Versuchsanlage hat umfangreiche Mess-, Regel- und Bedienfunktionen, die von einer SPS über Touchscreen gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten via WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit dem kundeneigenen Netzwerk möglich.

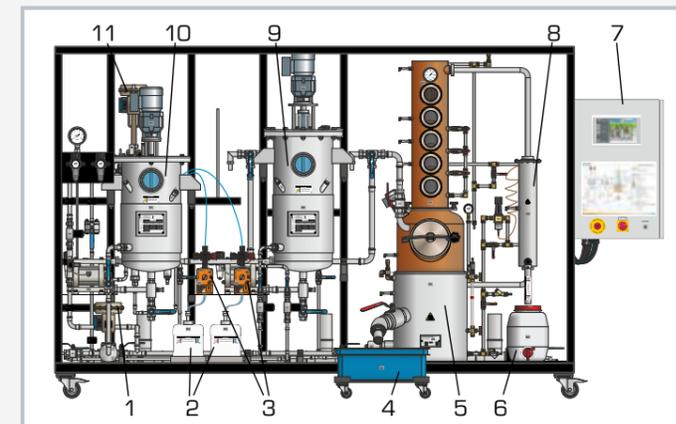
Die Dampfversorgung erfolgt über das Labornetz oder über den optional erhältlichen elektrischen Dampferzeuger (CE 715.01).

#### Lerninhalte / Übungen

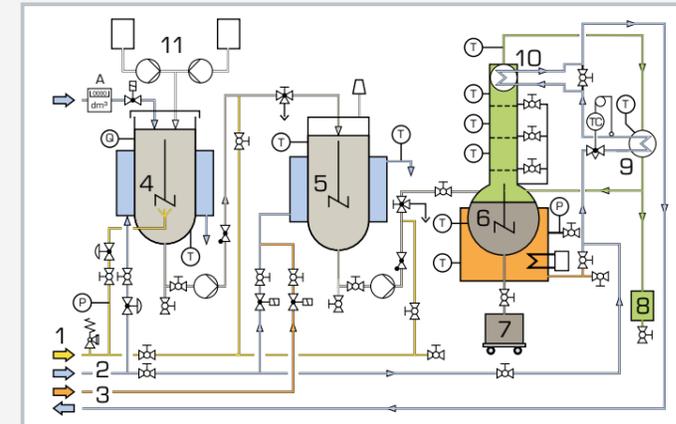
- notwendige Einzelschritte und Anlagenkomponenten zur Ethanolherstellung kennenlernen
  - ▶ Verkleisterung durch Dampf injektion
  - ▶ Verflüssigung unter Einsatz von Alpha-Amylase
  - ▶ Verzuckerung unter Einsatz von Gluco-Amylase
  - ▶ Gärung: Umsatz von Zucker zu Ethanol durch Hefekulturen unter anaeroben Verhältnissen
  - ▶ Destillation: Abtrennung von Ethanol aus der Maische
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

## CE 640

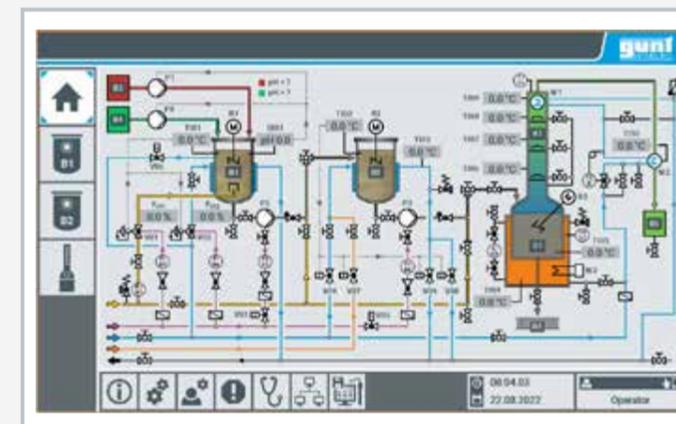
### Biotechnische Herstellung von Ethanol



1 Regelventil Kühlwasser, 2 Behälter Säure/Lauge, 3 Pumpen Säure/Lauge, 4 Schlempebehälter (fahrbar), 5 Destillationseinheit, 6 Produktbehälter, 7 Schaltschrank, 8 Kondensator, 9 Gärbehälter, 10 Maischebehälter, 11 Regelventil Heizdampf



1 Heizdampf, 2 Kühlwasser, 3 Heizwasser, 4 Maischebehälter, 5 Gärbehälter, 6 Destillationskolonne, 7 Schlempebehälter, 8 Produktbehälter, 9 Kondensator, 10 Dephlegmator, 11 Pumpen und Behälter Säure/Lauge; P Druck, T Temperatur, A Wassermenge, Q pH-Wert



Screenshot des Touchscreens der SPS-Steuerungseinheit

#### Spezifikation

- [1] diskontinuierliche Umwandlung von stärkehaltigen Bio-rohstoffen in Ethanol
- [2] offener Maischebehälter mit mantelseitiger Wasserkühlung, Heizdampfinjektion und Rührer
- [3] geschlossener Gärbehälter mit Rührer und mantelseitiger Wasserkühlung/-heizung
- [4] Destillationseinheit mit 3 Glockenböden, Dephlegmator, Kondensator und Rührer
- [5] 2 Pumpen zur Förderung der Maische
- [6] Regelung des pH-Wertes im Maischebehälter mit Säure und Lauge über Dosierpumpen
- [7] Einstellung der injizierten Heizdampfmenge, der Kühlwasserströme und der Kopftemperatur mit PID-Regler
- [8] Anlagensteuerung mit einer SPS, über Touchscreen bedienbar
- [9] integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an bis zu 5 Endgeräten
- [10] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk

#### Technische Daten

SPS: Eaton XV303

Maischebehälter: 40L

Gärbehälter: 50L

Produktbehälter: 10L

Schlempebehälter: 30L

Destillationseinheit

- Kolonne, Øxh: 220x1200mm

- Sumpfvolumen: 45L

- Sumpfheizung: 0...7500W

2 Druckluftmembranpumpen

- Antriebsdruck: 2bar

- max. Fördermenge: 15L/min

- max. Förderhöhe: 20m

- max. Feststoffgröße: 4mm

2 Dosierpumpen (Säure und Lauge)

- max. Fördermenge: je 2,1L/h

Messbereiche

- Temperatur: 10x 0...150°C

- Durchfluss: 0...25L/min (zum Maischebehälter)

- pH-Wert: 2...10

- Druck: 0...10bar (Dampf)

400V, 50Hz, 3 Phasen; 400V, 60Hz, 3 Phasen

230V, 60Hz, 3 Phasen; UL/CSA optional

LxBxH: 3500x1200x2000mm; Gewicht: ca. 500kg

#### Für den Betrieb erforderlich

Druckluft (1,5...6bar), Warm- und Kaltwasseranschluss (min. 400L/h, 40°C), Abfluss, CE 715.01 oder Dampf (10kg/h, min. 3bar)

#### Lieferumfang

Versuchsanlage, 1 Satz Enzyme etc., 1 Satz Zubehör, 1 Satz didaktisches Begleitmaterial

Basiswissen  
Biogas

Steigender Energiebedarf und die Begrenzung fossiler Energiequellen erfordern neue Konzepte zur Sicherstellung der Energieversorgung. Neben der Solar- und Windenergie stellt die Energiegewinnung aus Biomasse einen wichtigen Baustein zukünftiger Energiekonzepte dar.

In einer Biogasanlage bauen Mikroorganismen unter Ausschluss von Licht und Sauerstoff die organischen Ausgangsstoffe (Substrat) biologisch ab. Als Produkt dieses anaeroben Abbaus entsteht ein Gasgemisch, das zum überwiegenden Teil aus Methan besteht. Dieses Gasgemisch bezeichnet man als Biogas.



Die komplexen Vorgänge des anaeroben Abbaus können vereinfacht in vier aufeinander folgende Phasen unterteilt werden.

**Phase 1: Hydrolyse**

Das in Biogasanlagen eingesetzte Substrat liegt in Form von ungelösten, hochmolekularen Verbindungen vor, wie z.B. Proteine, Fette und Kohlenhydrate. Daher müssen diese Verbindungen zunächst in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt werden. Als Produkt der Hydrolyse entstehen Aminosäuren, Zucker und Fettsäuren.

**Phase 2: Versäuerung**

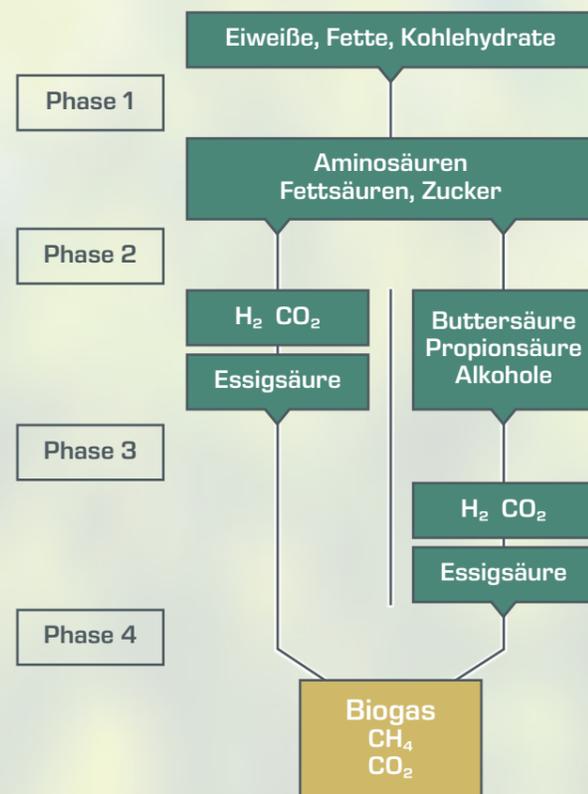
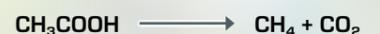
Aus den Produkten der Hydrolyse entstehen nun durch biochemischen Abbau hauptsächlich Propionsäure, Buttersäure, Essigsäure, Alkohole, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid.

**Phase 3: Essigsäure-Bildung**

Die Produkte der vorherigen Phase werden nun in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt.

**Phase 4: Methanbildung**

Methanbakterien können für ihren Stoffwechsel entweder Essigsäure ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) oder Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff verwerten. Folgende beiden biochemischen Reaktionen können zur Bildung von Methan ( $\text{CH}_4$ ) führen:



Grundprinzip des anaeroben Abbaus

**Umgebungsbedingungen**

Die an dem anaeroben Abbau beteiligten Mikroorganismen haben unterschiedliche Anforderungen an die Umgebungsbedingungen. Dies betrifft in erster Linie den pH-Wert und die Temperatur. Insbesondere die Methanbakterien reagieren sehr empfindlich auf Abweichungen dieser beiden Prozessgrößen von ihrem jeweiligen optimalen Wert. Finden alle 4 Phasen des Abbaus in einem Reaktor statt,

muss hinsichtlich der Temperatur und des pH-Wertes ein Kompromiss gefunden werden. Dies hat eine geringere Biogasausbeute zur Folge. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist eine zweistufige Prozessführung in zwei getrennten Reaktoren sinnvoller. Auf diese Weise lassen sich die Umgebungsbedingungen gezielter an die jeweiligen Mikroorganismen anpassen.

**Nutzung von Biogas**

Das entstandene Biogas kann nun in einem Blockheizkraftwerk verbrannt werden. Dadurch wird die im Biogas gespeicherte Energie in Rotationsenergie umgewandelt. Ein angeschlossener Generator erzeugt hieraus wiederum elektrischen Strom. Ein Blockheizkraftwerk erzeugt neben elektrischer Energie auch Wärme, die z.B. zur Beheizung des Reaktors oder von Räumlichkeiten genutzt werden kann.

Funktionsprinzip einer Biogasanlage:

- 1 Gülle aus Viehhaltung
- 2 nachwachsende Rohstoffe (z.B. Mais)
- 3 Vorlage für zerkleinerte Rohstoffe
- 4 Vorlage für Beschickung des Bioreaktors
- 5 Bioreaktor (Fermenter)
- 6 Gärrestspeicher
- 7 Biogasaufbereitung
- 8 Blockheizkraftwerk
- 9 Wasserkreislauf zur Beheizung des Bioreaktors
- 10 Einspeisung des Stroms ins öffentliche Netz
- 11 Gärrest (Verwendung als Dünger)



## CE 642 Biogasanlage



Die Abbildung zeigt von links: Versorgungseinheit, Versuchsstand und Nachgärungseinheit; Screen-Mirroring ist an verschiedenen Endgeräten möglich

### Beschreibung

- **zweistufige Biogasanlage**
- **umfangreiche Analyse des Biogases**
- **Anlagensteuerung mit einer SPS über Touchscreen**
- **integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an weiteren Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone**

In einer Biogasanlage bauen Mikroorganismen unter Ausschluss von Licht und Sauerstoff die organischen Ausgangsstoffe (Substrat) biologisch ab. Als Produkt dieses anaeroben Abbaus entsteht ein Gasgemisch, das zum überwiegenden Teil aus Methan besteht. Dieses Gasgemisch bezeichnet man als Biogas.

Die Versuchsanlage CE 642 demonstriert praxisnah die Erzeugung von Biogas. Als Substrat dient eine Suspension aus zerkleinerten, organischen Feststoffen. Im ersten Rührkesselreaktor findet die Hydrolyse und Versäuerung des Substrates statt. Dabei wandeln anaerobe Mikroorganismen langkettige organische Stoffe zu kurzkettigen organischen Stoffen um. Im zweiten Rührkesselreaktor entsteht im letzten Schritt des anaeroben Abbaus Biogas, das überwiegend Methan und Kohlendioxid enthält. Durch diese zweistufige Betriebsweise lassen sich die Umgebungsbedingungen in beiden Reaktoren getrennt voneinander einstellen und optimieren. Der Gärrest

wird einem separaten Behälter gesammelt.

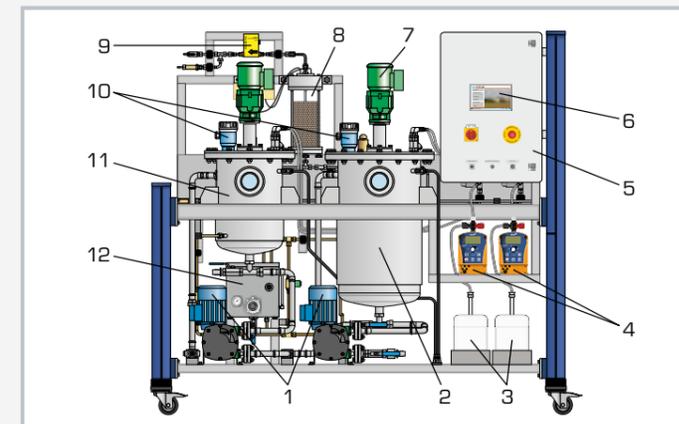
Temperatur und pH-Wert werden in beiden Reaktoren geregelt. Das entstehende Biogas wird in einer Kolonne getrocknet. Die Kolonne ist mit Silikagel gefüllt. Anschließend werden Durchfluss, Feuchte, Methangehalt, Kohlendioxidgehalt und Temperatur des Biogases erfasst. Die Versuchsanlage wird über Touchscreen von einer SPS gesteuert. Mittels integrierter Router kann die Versuchsanlage alternativ über ein Endgerät bedient und gesteuert werden. Die Bedienoberfläche kann zusätzlich an weiteren Endgeräten dargestellt werden (Screen-Mirroring). Über die SPS können die Messwerte intern gespeichert werden. Der Zugriff auf gespeicherte Messwerte ist von Endgeräten via WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit dem kundeneigenen Netzwerk möglich.

Die Versuchsanlage kann sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich betrieben werden. Für die Versuche ist anaerobe Biomasse von einer Biogasanlage erforderlich. Zur Herstellung des Substrates können z.B. Kartoffeln oder Mais verwendet werden. Zur Spülung der Versuchsanlage ist ein Inertgas (z.B. Kohlendioxid) erforderlich.

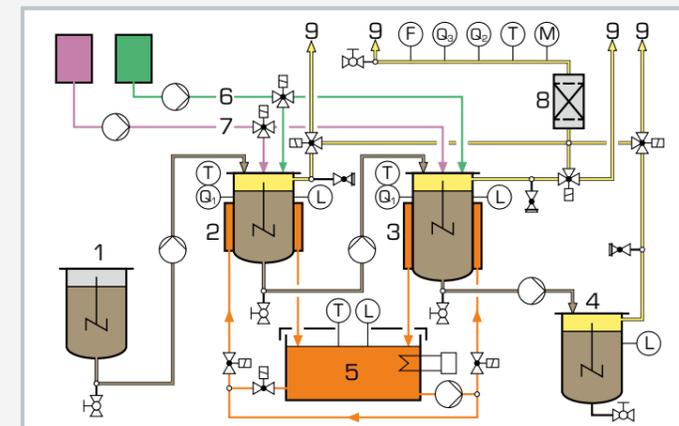
### Lerninhalte / Übungen

- Herstellung eines stabilen Betriebszustandes
- Einfluss der folgenden Prozessgrößen auf die Biogaserzeugung
  - ▶ Temperatur
  - ▶ Substrat
  - ▶ Raumbelastung
  - ▶ pH-Wert
- Einfluss der Betriebsweise auf die Biogasausbeute
  - ▶ einstufig und zweistufig
  - ▶ mit und ohne Nachgärung
  - ▶ kontinuierlich und diskontinuierlich
- Bestimmung folgender Größen in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen
  - ▶ Biogasausbeute
  - ▶ Biogasbildungsrate
  - ▶ Biogasqualität
- Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an Endgeräten
  - ▶ Navigation im Menü unabhängig von gezeigter Oberfläche am Touchscreen
  - ▶ verschiedene Benutzerebenen am Endgerät wählbar: zur Verfolgung von Versuchen oder zur Steuerung und Bedienung

## CE 642 Biogasanlage



1 Schlauchpumpen, 2 Reaktor (Stufe 2), 3 Behälter für Säure und Lauge, 4 Dosierpumpen, 5 Schaltschrank, 6 SPS mit Touchscreen, 7 Rührwerk, 8 Trocknungskolonne, 9 Durchflussmesser (Biogas), 10 kapazitive Füllstandsaufnehmer, 11 Reaktor (Stufe 1), 12 Heizwasserbehälter



1 Substratbehälter, 2 Reaktor (Stufe 1), 3 Reaktor (Stufe 2), 4 Gärrestbehälter, 5 Heizwasser, 6 Säure, 7 Lauge, 8 Trocknungskolonne, 9 Biogas; F Durchfluss, L Füllstand, M Feuchte, G<sub>1</sub> pH-Wert, G<sub>2</sub> Methangehalt, G<sub>3</sub> Kohlendioxidgehalt, T Temperatur



Bedienoberfläche der SPS: Menüpunkt "Gasanalyse"

### Spezifikation

- [1] zweistufige Biogasanlage (kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Betrieb möglich)
- [2] 2 Rührkesselreaktoren aus Edelstahl mit kapazitiven Füllstandsaufnehmern
- [3] separate Versorgungseinheit mit Substratbehälter und Feedpumpe
- [4] Regelung von Temperatur, pH-Wert in den Reaktoren
- [5] 2 Dosierpumpen für Säure bzw. Lauge
- [6] Heizwasserkreislauf mit Behälter, Heizer, Temperaturregler und Pumpe
- [7] Trocknung des Biogases mit Silikagel
- [8] Analyse des Biogases: Menge, Methan- und Kohlendioxidgehalt, Feuchte und Temperatur
- [9] Anlagensteuerung mit einer SPS über Touchscreen
- [10] integrierter Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring: Spiegelung der Bedienoberfläche an bis zu 5 Endgeräten
- [11] Datenerfassung über SPS auf internem Speicher, Zugriff auf gespeicherte Messwerte über WLAN mit integriertem Router/ LAN-Anbindung mit kundeneigenem Netzwerk

### Technische Daten

- SPS: Eaton XV303  
Behälter aus Edelstahl
- Reaktor (Stufe 1): 26,3L
  - Reaktor (Stufe 2): 73,5L
  - Substratbehälter: ca. 30L
  - Gärrestbehälter: 26,3L
- Pumpen
- 3 Schlauchpumpen: je max. 25L/h
  - 2 Dosierpumpen: je max. 2,1L/h
  - Heizwasserpumpe: max. 480L/h
- Rührwerke
- Substratbehälter: max. 200min<sup>-1</sup>
  - Reaktoren: je max. 120min<sup>-1</sup>

### Messbereiche

- Methangehalt: 0...100%
- Kohlendioxidgehalt: 0...100%
- Durchfluss: 0...30NL/h (Biogas)
- pH-Wert: 2x 1...14
- Feuchte: 0...100%
- Temperatur: 3x 0...100°C (Reaktoren und Biogas)

400V, 50Hz, 3 Phasen; 400V, 60Hz, 3 Phasen  
230V, 60Hz, 3 Phasen; UL/CSA optional  
LxBxH: 1100x790x1400mm (Versorgungseinheit)  
LxBxH: 2060x790x1910mm (Versuchsstand)  
LxBxH: 1100x790x1400mm (Nachgärungseinheit)  
Gesamtgewicht: ca. 770kg

### Für den Betrieb erforderlich

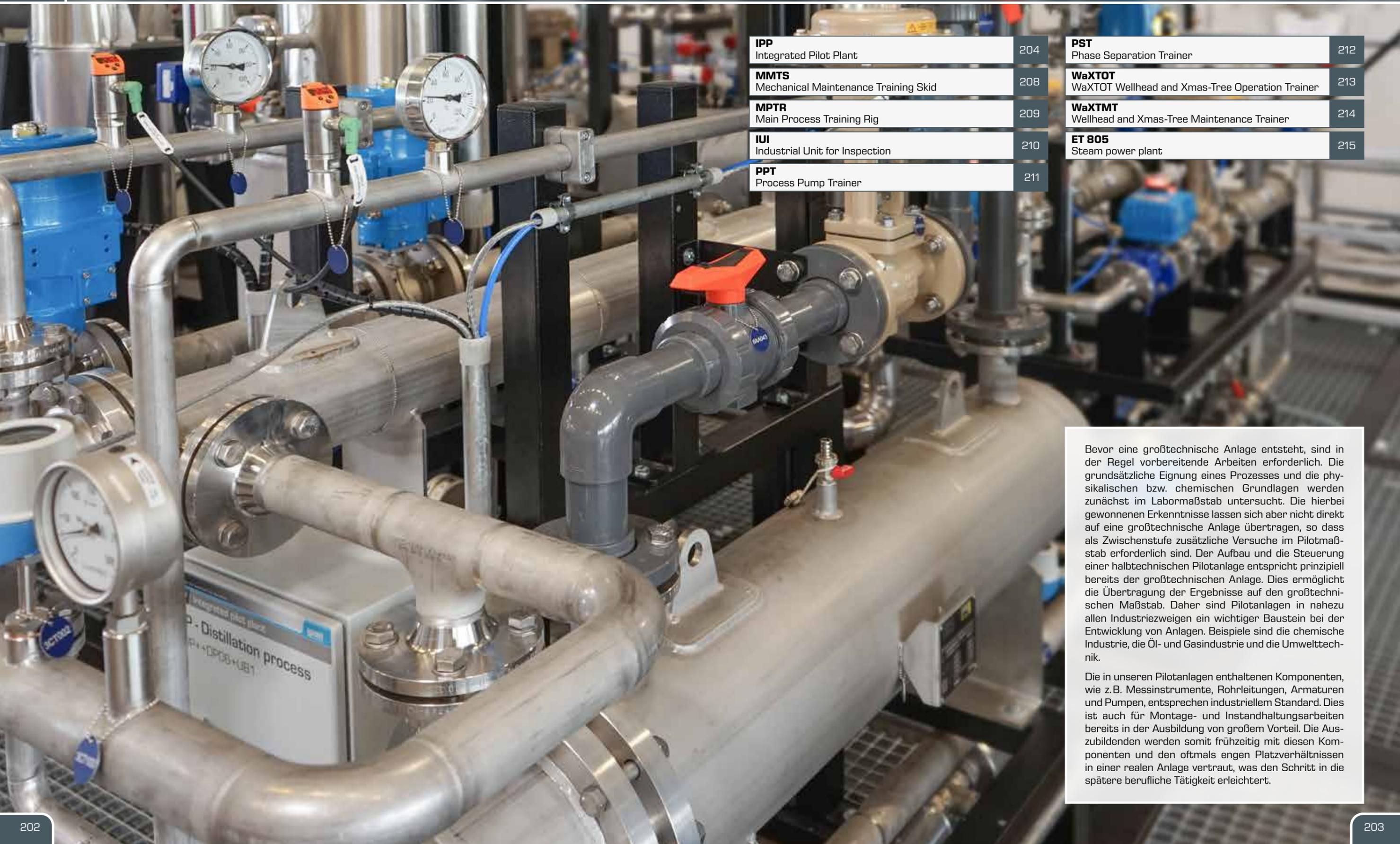
Biomasse von einer Biogasanlage, Substrat (Empfehlung: Kartoffeln oder Mais), Natronlauge, Salzsäure, Inertgas (z.B. Kohlendioxid) 5kg/h, min. 2bar; Wasseranschluss + Abfluss 300L/h, min. 3bar; Abluft + Belüftung 245m<sup>3</sup>/h

### Lieferumfang

- 1 Versuchsanlage, 1 Gebinde Silikagel
- 1 Satz Zubehör, 1 Satz didaktisches Begleitmaterial



## Pilotanlagen



<b>IPP</b> Integrated Pilot Plant	204
<b>MMTS</b> Mechanical Maintenance Training Skid	208
<b>MPTR</b> Main Process Training Rig	209
<b>IUI</b> Industrial Unit for Inspection	210
<b>PPT</b> Process Pump Trainer	211

<b>PST</b> Phase Separation Trainer	212
<b>WaXTOT</b> WaXTOT Wellhead and Xmas-Tree Operation Trainer	213
<b>WaXTMT</b> Wellhead and Xmas-Tree Maintenance Trainer	214
<b>ET 805</b> Steam power plant	215

Bevor eine großtechnische Anlage entsteht, sind in der Regel vorbereitende Arbeiten erforderlich. Die grundsätzliche Eignung eines Prozesses und die physikalischen bzw. chemischen Grundlagen werden zunächst im Labormaßstab untersucht. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich aber nicht direkt auf eine großtechnische Anlage übertragen, so dass als Zwischenstufe zusätzliche Versuche im Pilotmaßstab erforderlich sind. Der Aufbau und die Steuerung einer halbertechnischen Pilotanlage entspricht prinzipiell bereits der großtechnischen Anlage. Dies ermöglicht die Übertragung der Ergebnisse auf den großtechnischen Maßstab. Daher sind Pilotanlagen in nahezu allen Industriezweigen ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung von Anlagen. Beispiele sind die chemische Industrie, die Öl- und Gasindustrie und die Umwelttechnik.

Die in unseren Pilotanlagen enthaltenen Komponenten, wie z.B. Messinstrumente, Rohrleitungen, Armaturen und Pumpen, entsprechen industriellem Standard. Dies ist auch für Montage- und Instandhaltungsarbeiten bereits in der Ausbildung von großem Vorteil. Die Auszubildenden werden somit frühzeitig mit diesen Komponenten und den oftmals engen Platzverhältnissen in einer realen Anlage vertraut, was den Schritt in die spätere berufliche Tätigkeit erleichtert.

# IPP Integrated Pilot Plant

Diese Anlage demonstriert den Betrieb einer verfahrenstechnischen Anlage mit einem Wasser/Ethylenglykol-Gemisch als Hauptmedium. Die Anlage kombiniert Komponenten konventioneller Kreisprozesse mit Behältern, Wärmeübertragern, Pumpen und Kühlstrecken sowie Steuerung und Regelung eines Destillationsprozesses. Die Anlage besteht aus vier funktionellen Einheiten:

- Versorgungseinheit (Außenbereich)
- Versorgungseinheit (Innenbereich)
- Destillationsprozess
- Kreisprozess

Im Fokus dieser Anlage steht die Inbetriebnahme, Bedienung, Abschaltung und Wartung eines typischen verfahrenstechnischen Prozesses im industriellen Maßstab. Weitere didaktische Schwerpunkte sind:

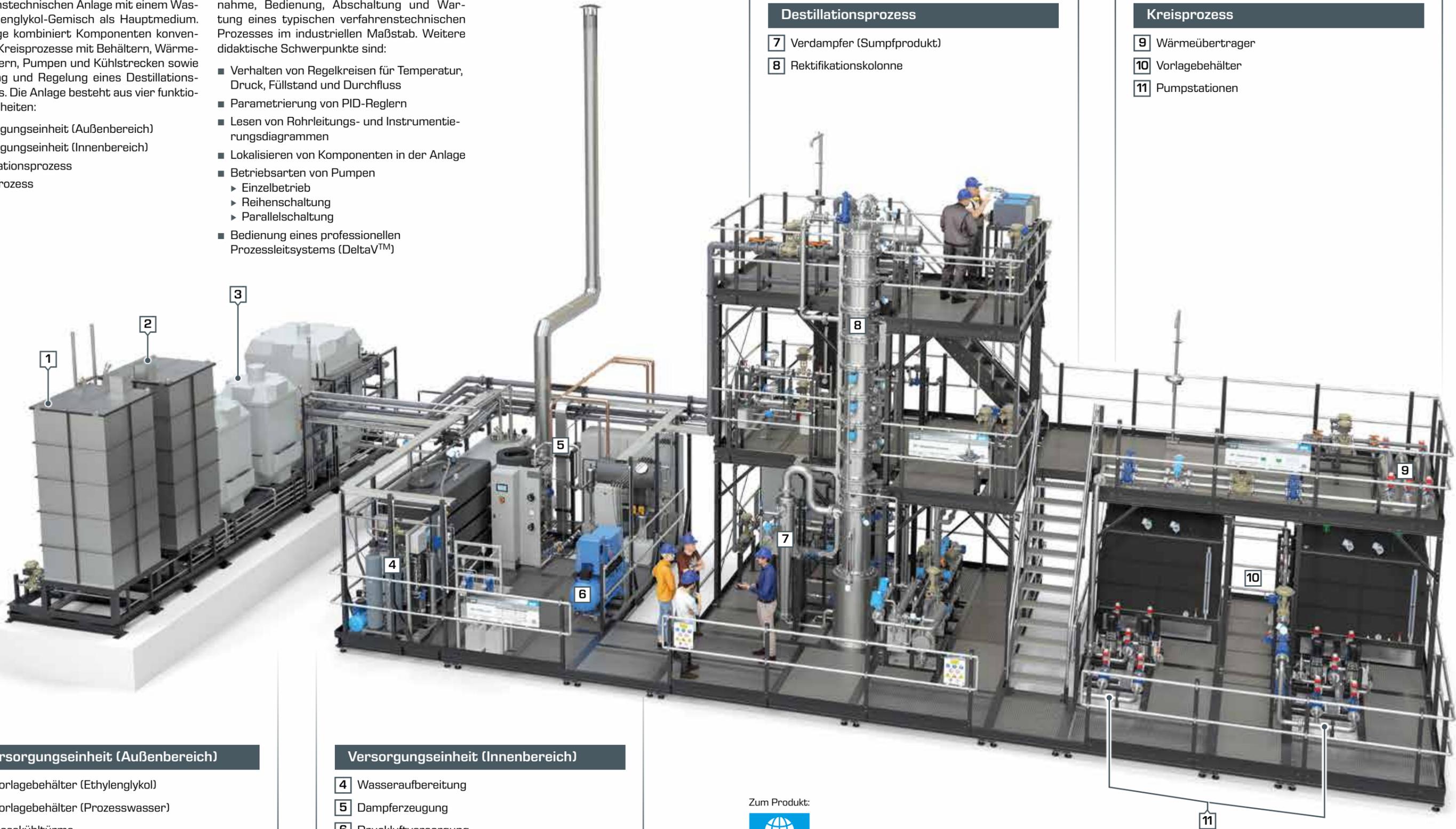
- Verhalten von Regelkreisen für Temperatur, Druck, Füllstand und Durchfluss
- Parametrierung von PID-Reglern
- Lesen von Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen
- Lokalisieren von Komponenten in der Anlage
- Betriebsarten von Pumpen
  - ▶ Einzelbetrieb
  - ▶ Reihenschaltung
  - ▶ Parallelschaltung
- Bedienung eines professionellen Prozessleitsystems (DeltaV™)

## Destillationsprozess

- 7 Verdampfer (Sumpfprodukt)
- 8 Rektifikationskolonne

## Kreisprozess

- 9 Wärmeübertrager
- 10 Vorlagebehälter
- 11 Pumpstationen



### Versorgungseinheit (Außenbereich)

- 1 Vorlagebehälter (Ethylenglykol)
- 2 Vorlagebehälter (Prozesswasser)
- 3 Nasskühltürme

### Versorgungseinheit (Innenbereich)

- 4 Wasseraufbereitung
- 5 Dampferzeugung
- 6 Druckluftversorgung

Zum Produkt:



## IPP Integrated Pilot Plant



Nasskühltürme und Vorlagebehälter für Prozesswasser und Ethylen-glykol im Außenbereich

### Versorgungseinheiten

Die Versorgungseinheiten stellen die benötigten Medien sowie Kühl- und Heizleistung zur Verfügung. Die drei Nasskühltürme und die beiden Vorlagebehälter für Prozesswasser und Ethylen-glykol sind im Außenbereich aufgestellt. Der Dampferzeuger, die Druckluftversorgung, die Wasseraufbereitung und die beiden Chemikaliendosierstationen sind im Innenbereich installiert.

Die Aufbereitung des Prozesswassers besteht aus fünf Schritten:

- Ionenaustausch
- Filtration
- Umkehrosmose
- Membranentgasung
- UV-Desinfektion

### Destillationsprozess

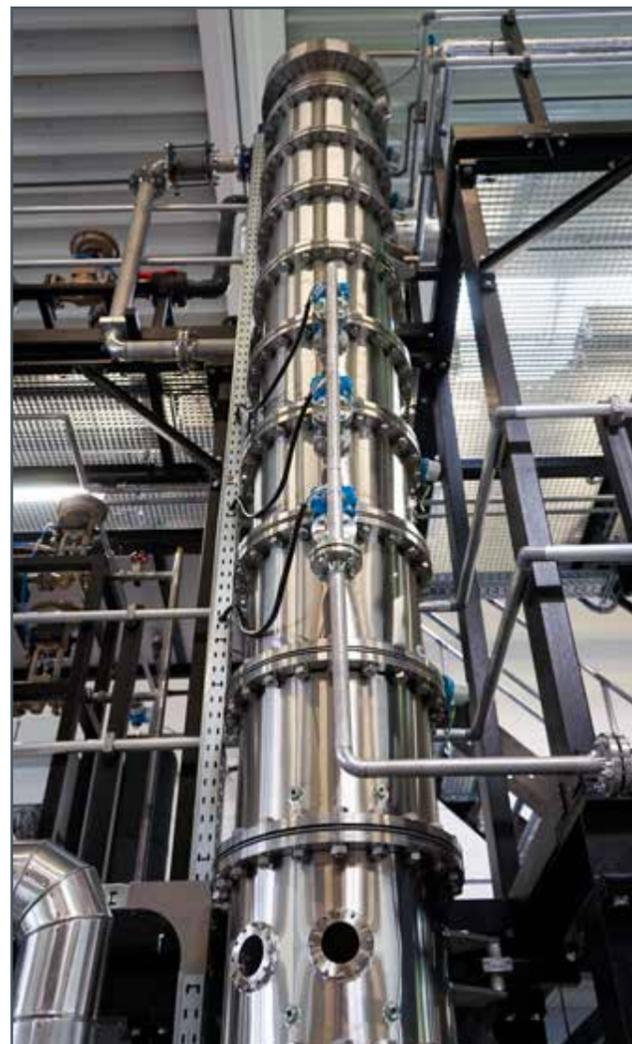
Hauptbestandteil des Destillationsprozesses ist eine Rektifikationskolonne mit 10 Glockenböden. Das Wasser-Glykol-Gemisch wird durch natürliche Umwälzung in einem Verdampfer erhitzt. Anschließend wird das Wasser-Glykol-Gemisch in der Kolonne in Wasserdampf und flüssiges Glykol getrennt. Die Beschickung des Destillationsprozesses erfolgt entweder aus der Versorgungseinheit oder aus dem Kreisprozess.

### Kreisprozess

In dem Kreisprozess wird ein Wasser-Glykol-Gemisch erhitzt und mit Pumpen im Kreis gefördert. Im Vorlagebehälter wird das Wasser-Glykol-Gemisch erhitzt. Prozessregelkreise mit Regelgrößen wie Temperatur, Druck, Füllstand und Durchfluss sind Teil des Kreisprozesses.



Kreisprozess: Redundante Pumpen und Coriolis-Durchflussmesser



Destillationsprozess: Rektifikationskolonne



Verwendung hochwertiger Komponenten auf industriellem Niveau

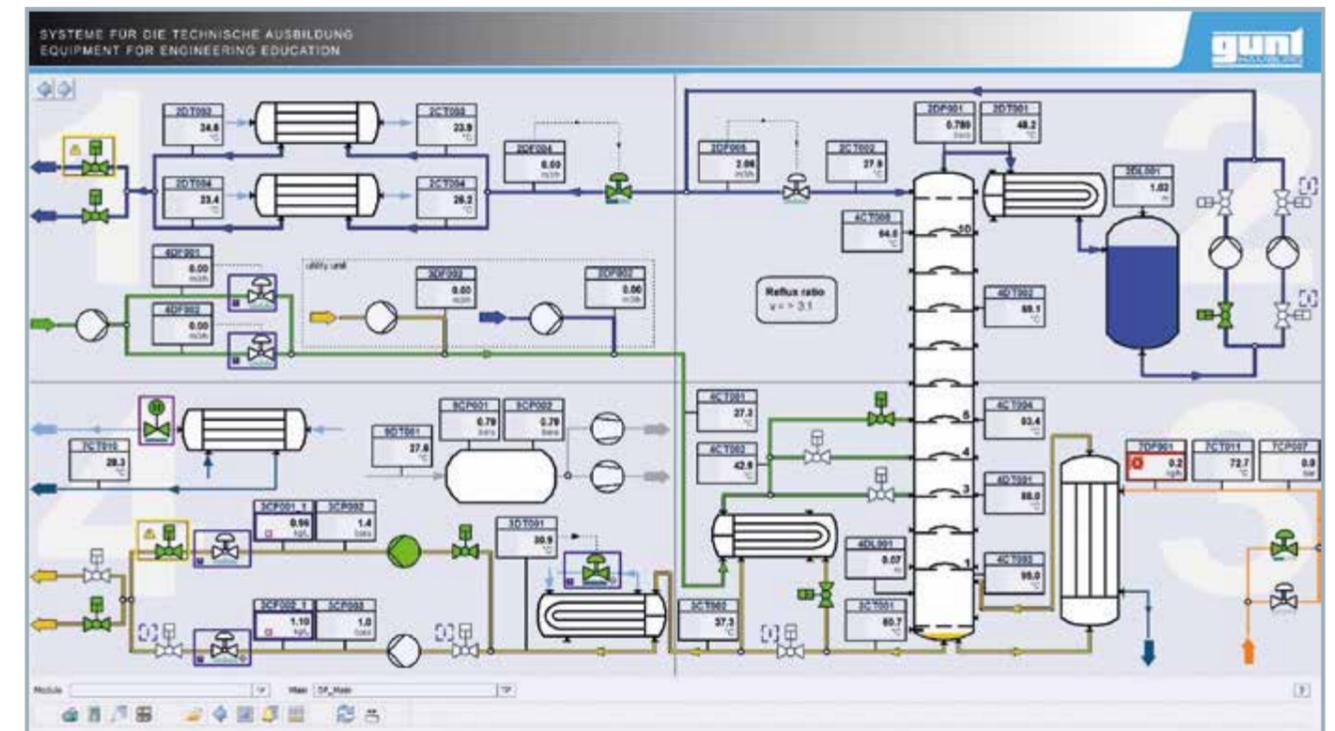


IPP während des Testbetriebes vor Auslieferung der Anlage

### Prozessleitsystem

Zur Steuerung der Anlage wird das Prozessleitsystem **DeltaV™** der Firma **Emerson Electric Co.** verwendet. Dieses Automatisierungssystem ist sehr benutzerfreundlich und in der Prozess- und Energieindustrie sehr verbreitet. DeltaV™ verfügt über moderne Steuerungsfunktionen und ermöglicht dem Bediener jederzeit eine optimale Kontrolle der Anlage.

Alle relevanten Variablen des Prozesses werden durch Sensoren gemessen und an den Arbeitsplatz des Bedieners übertragen. Die verschiedenen Prozesssteuerungsoptionen und Prozessregelkreise können individuell ausgewählt werden, um mehrere verschiedene Betriebszustände zu realisieren.



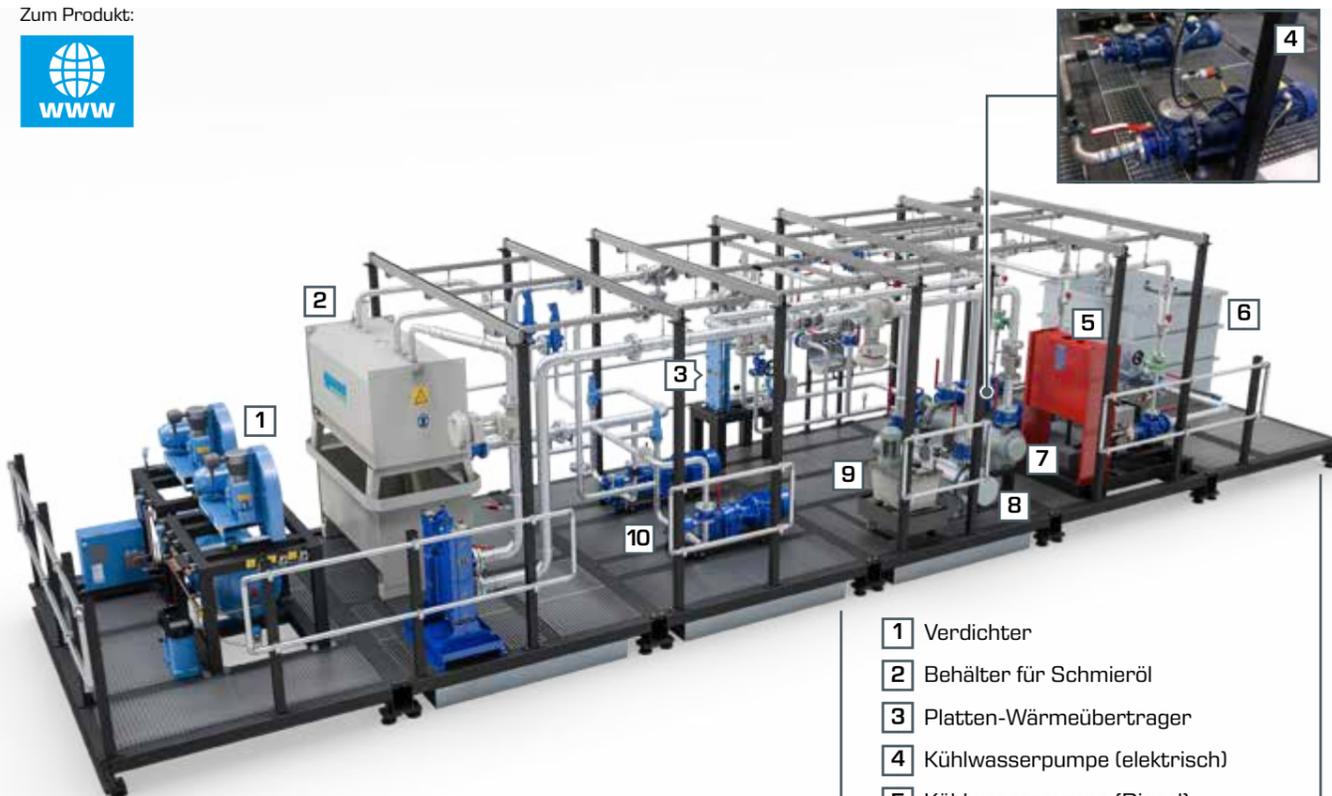
Visualisierung des Prozessleitsystems DeltaV™ (Destillationseinheit)

## MMTS Mechanical Maintenance Training Skid

Die Übungsanlage MMTS dient der Wartung von mechanischen Bauteilen sowie dem Messen, Steuern und Regeln diverser Parameter in einem Rohrleitungssystem mit mehreren Medien. In der realen Anwendung sind derartige Systeme in Kraftwerken sowie in Anlagen zur Mineralölverarbeitung und Erdgasaufbereitung zu finden. Die Übungsanlage enthält – im Gegensatz zur industriellen Anwendung – keine tatsächlichen Motoren oder Turbinen. Der Wärmeeintrag dieser Maschinen wird simuliert, indem ein Heizer Schmieröl erhitzt. Im Kernprozess der Übungsanlage wird die so entstehende Wärme über einen Wärmeübertrager und Kühlwasserkreislauf abgeführt.

Diverse Sensoren erfassen Druck, Durchfluss, Füllstand und Temperatur. Die Bedienung der Übungsanlage erfolgt über einen Touchscreen im Schaltschrank mittels SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Über eine weitere Software, die auf einem PC läuft, werden Messdaten erfasst.

Zum Produkt:



- 1 Verdichter
- 2 Behälter für Schmieröl
- 3 Platten-Wärmeübertrager
- 4 Kühlwasserpumpe (elektrisch)
- 5 Kühlwasserpumpe (Diesel)
- 6 Kühlwasserbehälter
- 7 Rohrbündel-Wärmeübertrager
- 8 Heizer für Schmieröl
- 9 Versorgungseinheit für Hydrauliköl
- 10 Ölpumpen

- Schmierölkreislauf mit Schmieröltank, 2 Pumpen, Heizung und Schmierölkühler
- Kühlwasserkreislauf mit Kühlwassertank und 3 Pumpen zur Kühlung des Schmieröls über den Schmierölkühler
- Hydraulikölkreislauf mit Hydrauliköltank, Druckspeicher und Pumpe, um hydraulisch betätigte Ventile zu versorgen
- Druckluftversorgung mit 2 Kompressoren und Druckbehälter, um pneumatische Antriebe der Stellventile mit Druckluft zu versorgen
- Kühlturmkreislauf mit Kühlturm und Kühlturmwanne zur Rückkühlung des Kühlwasserkreislaufs über den Sekundärwasserkühler

## MPTR Main Process Training Rig

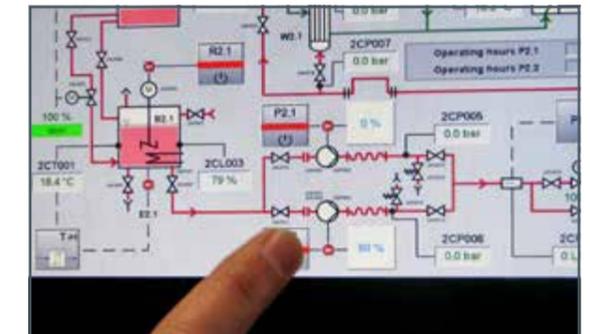
Das Trainingsgerät MPTR basiert vollständig auf industriellen Technologien. Es stellt eine komplexe Projektaufgabe für die Ausbildung von Rohrleitungs- und Anlagenbauern sowie für Wartungstechniker dar. In dieser Anlage können mechanische, elektrische und hydraulische Themen behandelt werden. Die Anlage ist in zwei Einheiten unterteilt:

Einheit 1: Durchflussregelung und Niveauregelung

Einheit 2: Durchflussregelung, Niveauregelung und Temperaturregelung

Jede Einheit enthält einen kompletten Prozesskreislauf mit Pumpen, Tanks und den erforderlichen Rohrleitungen. Es enthält eine Vielzahl von Fittings und Messtechnik. Die Anlage beinhaltet auch typische Industriekomponenten wie Wärmeübertrager, Filter oder Heizungen. Auf diese Weise entsteht eine realistische industrielle Situation. Das Design der Anlage erfordert Arbeiten auf engstem Raum, in der Höhe oder unter anderen Ausrüstungskomponenten. Dadurch erhält der Auszubildende ein realitätsnahes Umfeld, wie es in Industrieanlagen vorzufinden ist.

Beide Einheiten sind mechanisch, hydraulisch und elektrisch voneinander unabhängig. Für die beiden Einheiten stehen zwei separate Schaltschränke zur Verfügung. Die Bedienung jeder Einheit erfolgt mit jeweils mit einem eigenen Touchscreen.



Bedienung mit Touchscreen



Zum Produkt:



Wie bei allen Pilotanlagen gewährleisten hochwertige Industriekomponenten einen maximalen Praxisbezug und somit eine optimale Vorbereitung der Auszubildenden auf die spätere berufliche Tätigkeit.



## IUI Industrial Unit for Inspection

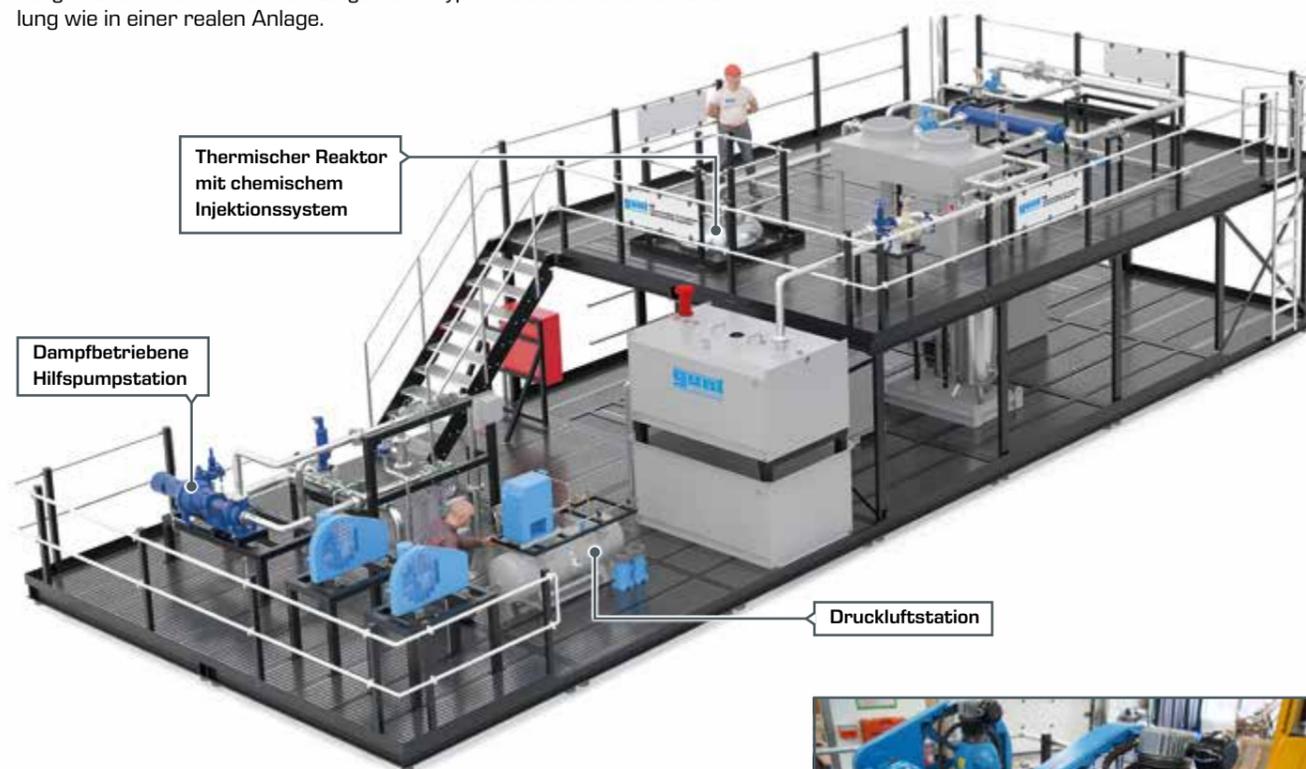
Kenntnisse über industrielle Komponenten spielen eine wichtige Rolle in der Ausbildung von Industrieprüfern. Um sich dieses Wissen anzueignen, ist es sehr hilfreich, an Anlagen im realen Maßstab zu üben. Für diesen Zweck hat GUNT eine Demonstrationsanlage entwickelt, welche die wichtigsten Komponenten einer verfahrenstechnischen Anlage enthält. Es wurde darauf geachtet, dass alle verwendeten Komponenten in einer realen Umgebung zu finden sind. Das erleichtert es den Auszubildenden, sich mit einer typischen verfahrenstechnischen Anlage vertraut zu machen, die Funktion einzelner Teile und die Zusammenhänge zwischen allen Komponenten einer Anlage zu verstehen. Die Demonstrationsanlage besteht aus drei Teilen:

- Thermischer Reaktor mit chemischen Injektionssystem
- Dampfbetriebene Hilfspumpstation
- Druckluftstation

Alle diese Teile sind über Rohre und Ventile verbunden. Eine Vielzahl elektrischer Komponenten wie Kabel, Schalter, Schütze, Displays, Sicherungen und ein Schaltschrank zeigen eine typische elektrische Verkabelung wie in einer realen Anlage.



Thermischer Reaktor mit chemischen Injektionssystem



Thermischer Reaktor mit chemischem Injektionssystem

Dampfbetriebene Hilfspumpstation

Druckluftstation



Dampfbetriebene Hilfspumpstation



Druckluftstation

Zum Produkt:



## PPT Process Pump Trainer

In der Ölindustrie wird Rohöl aus einem Bohrloch gefördert und dann zur weiteren Verarbeitung gepumpt. Im Prozesspumpentrainer (PPT) werden drei verschiedene Pumpentypen in verschiedenen Betriebsarten betrieben und miteinander verglichen. Das Arbeitsmedium ist ein Gemisch aus Luft, Wasser und Öl, um Rohöl zu simulieren. Nach Passieren des Pumpenteils wird das synthetische Rohöl durch Phasentrennung in Öl, Wasser und Luft gespalten und anschließend erneut gemischt, um eine homogene Zusammensetzung zu gewährleisten.

Der Trainer besteht aus drei Pumpeneinheiten und einer Versorgungseinheit. Jede Pumpeneinheit ist mit zwei identischen Pumpen ausgestattet. Die verwendeten Pumpentypen sind:

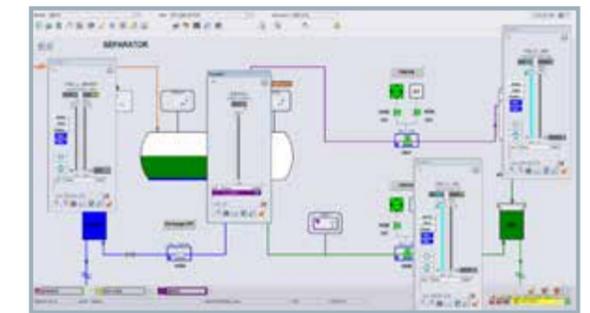
- Pumpeneinheit 1: Einstufige Kreiselpumpen
- Pumpeneinheit 2: Mehrstufige Kreiselpumpen
- Pumpeneinheit 3: Mehrphasige Doppelschneckenpumpen

In der Anlage werden vier verschiedene und hochwertige Durchflussmesser eingesetzt:

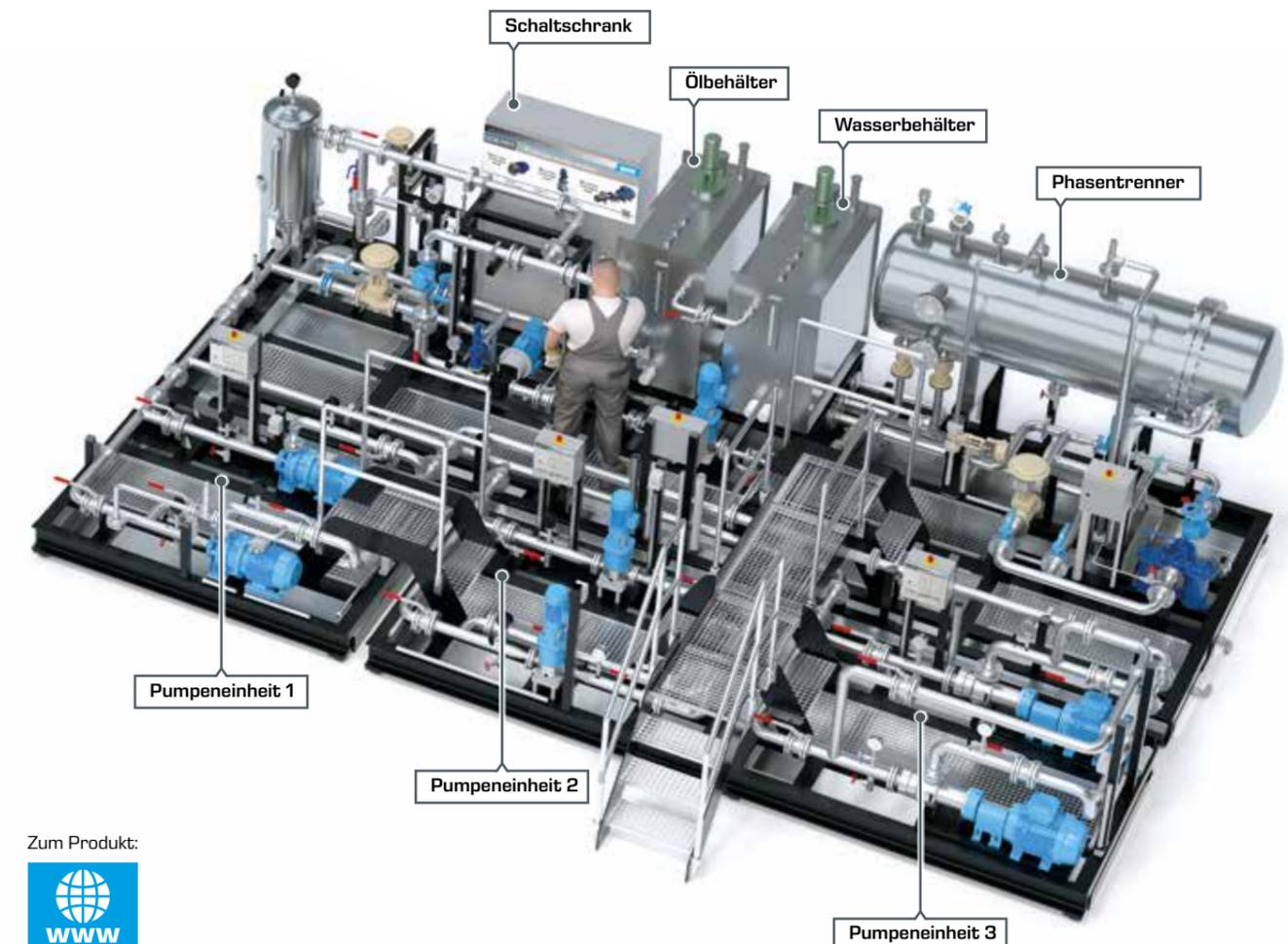
- Coriolis-Durchflussmesser
- Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
- Ovalrad-Durchflussmesser
- Thermischer Massendurchflussmesser

### Prozessleitsystem

Zur Steuerung der Anlage wird das Prozessleitsystem **DeltaV™** der Firma **Emerson Electric Co.** verwendet. Dieses Automatisierungssystem ist sehr benutzerfreundlich und in der Prozess- und Energieindustrie sehr verbreitet. DeltaV™ verfügt über moderne Steuerungsfunktionen und ermöglicht dem Bediener jederzeit eine optimale Kontrolle der Anlage.



Visualisierung des Prozessleitsystems DeltaV™



Schaltschrank

Ölbehälter

Wasserbehälter

Phasentrenner

Pumpeneinheit 1

Pumpeneinheit 2

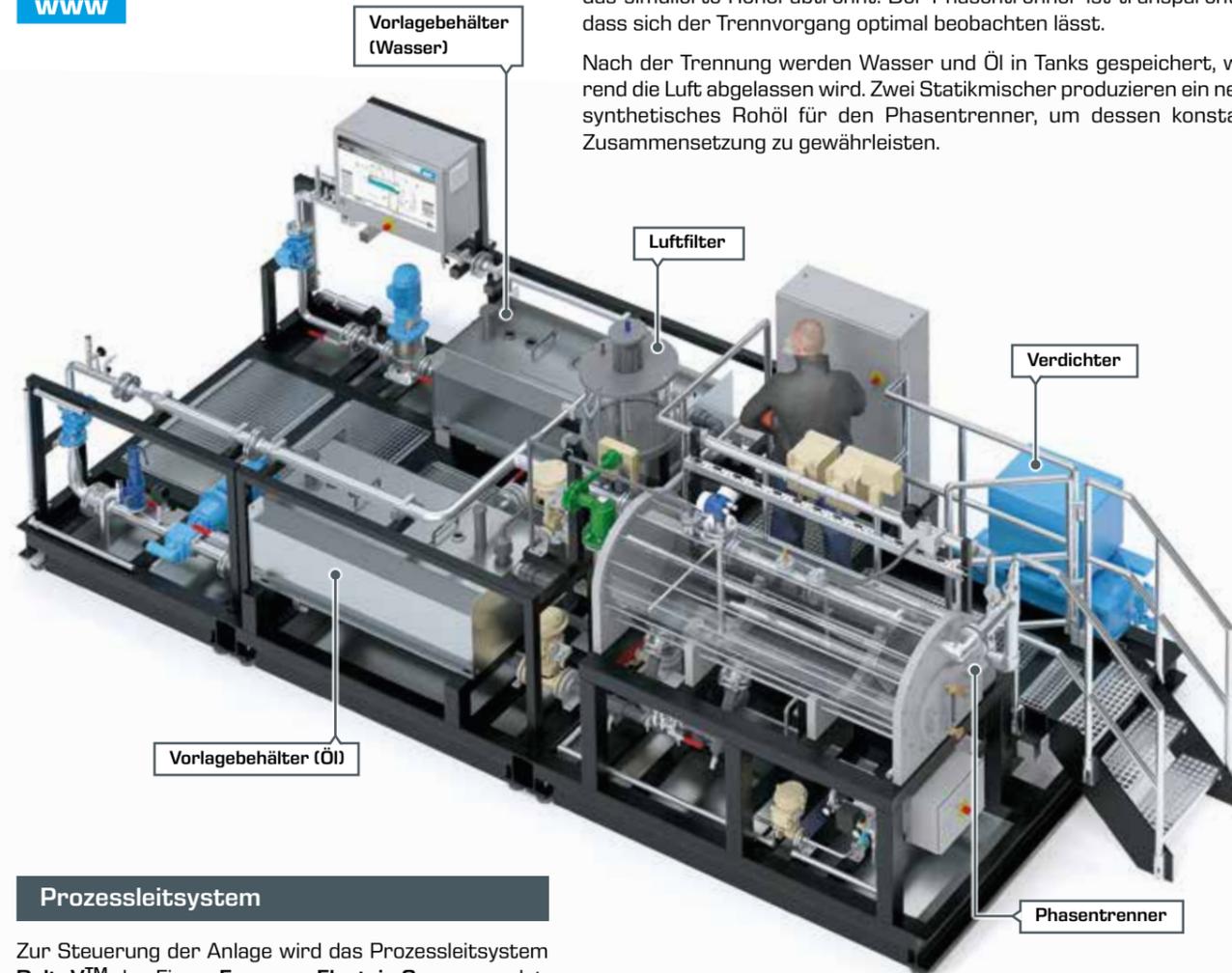
Pumpeneinheit 3

Zum Produkt:



## PST Phase Separation Trainer

Zum Produkt:

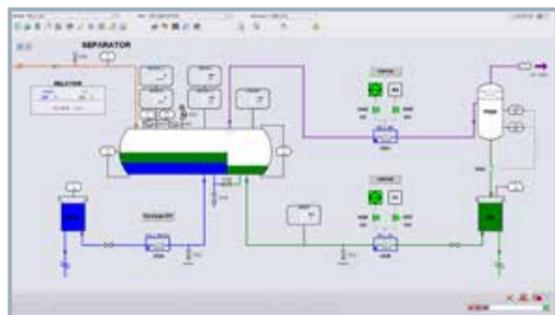


Diese Anlage demonstriert die Trennung von simuliertem Rohöl in Luft, Wasser und Öl. Hauptbestandteil der Anlage ist ein Phasentrenner, der unter Ausnutzung eines wirbelförmigen Einlaufs und der Schwerkraft das simulierte Rohöl abtrennt. Der Phasentrenner ist transparent, so dass sich der Trennvorgang optimal beobachten lässt.

Nach der Trennung werden Wasser und Öl in Tanks gespeichert, während die Luft abgelassen wird. Zwei Statikmischer produzieren ein neues synthetisches Rohöl für den Phasentrenner, um dessen konstante Zusammensetzung zu gewährleisten.

### Prozessleitsystem

Zur Steuerung der Anlage wird das Prozessleitsystem **DeltaV™** der Firma **Emerson Electric Co.** verwendet. Dieses Automatisierungssystem ist sehr benutzerfreundlich und in der Prozess- und Energieindustrie sehr verbreitet. DeltaV™ verfügt über moderne Steuerungsfunktionen und ermöglicht dem Bediener jederzeit eine optimale Kontrolle der Anlage.



Visualisierung des Prozessleitsystems DeltaV™



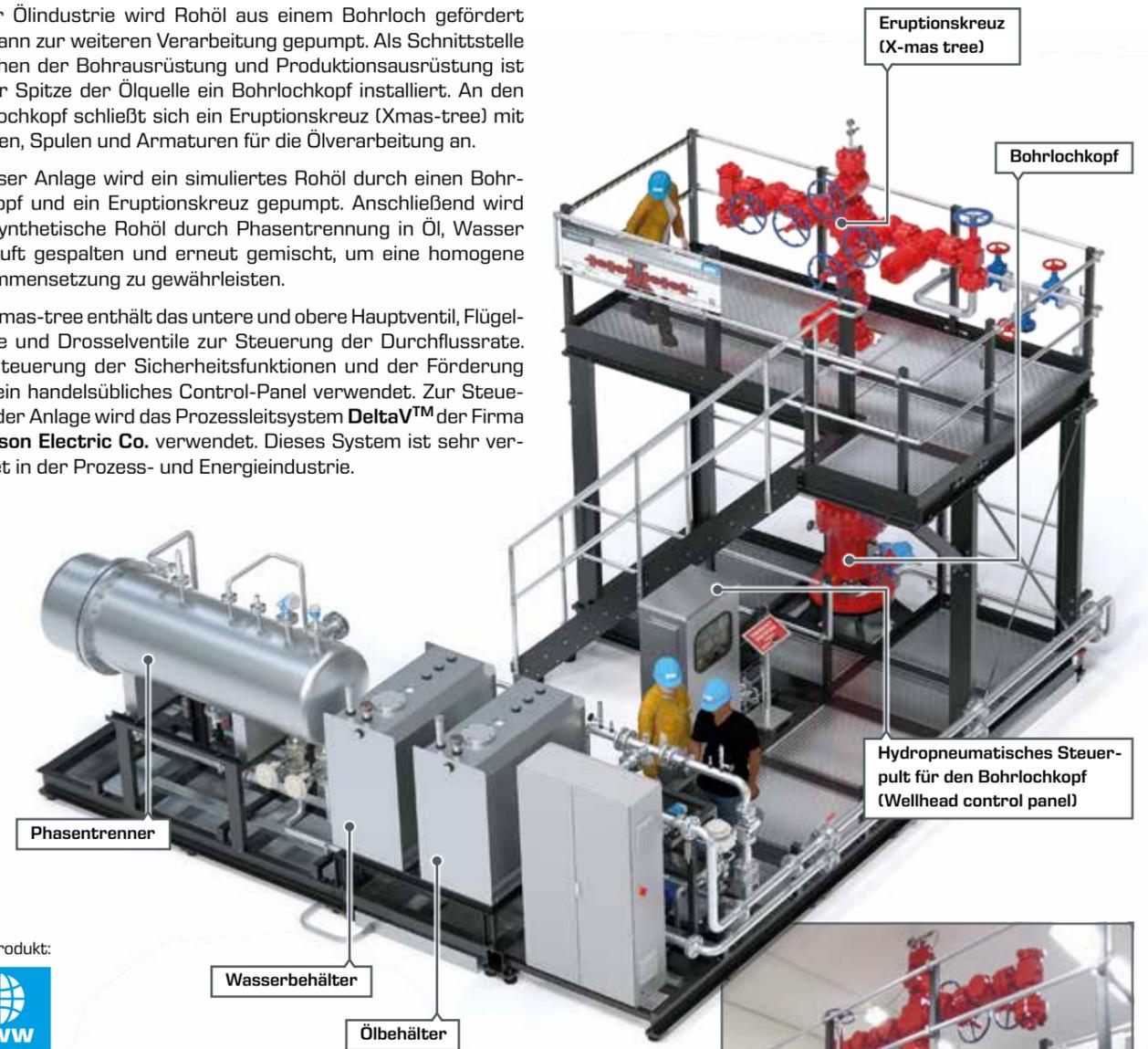
Phasentrenner

## WaXTOT Wellhead and Xmas-Tree Operation Trainer

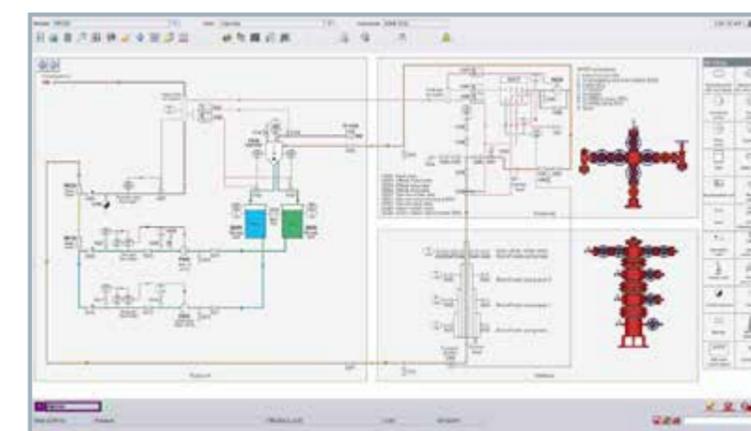
In der Ölindustrie wird Rohöl aus einem Bohrloch gefördert und dann zur weiteren Verarbeitung gepumpt. Als Schnittstelle zwischen der Bohrausrüstung und Produktionsausrüstung ist an der Spitze der Ölquelle ein Bohrlochkopf installiert. An den Bohrlochkopf schließt sich ein Eruptionskreuz (Xmas-tree) mit Ventilen, Spulen und Armaturen für die Ölverarbeitung an.

In dieser Anlage wird ein simuliertes Rohöl durch einen Bohrlochkopf und ein Eruptionskreuz gepumpt. Anschließend wird das synthetische Rohöl durch Phasentrennung in Öl, Wasser und Luft gespalten und erneut gemischt, um eine homogene Zusammensetzung zu gewährleisten.

Der Xmas-tree enthält das untere und obere Hauptventil, Flügelventile und Drosselventile zur Steuerung der Durchflussrate. Zur Steuerung der Sicherheitsfunktionen und der Förderung wird ein handelsübliches Control-Panel verwendet. Zur Steuerung der Anlage wird das Prozessleitsystem **DeltaV™** der Firma **Emerson Electric Co.** verwendet. Dieses System ist sehr verbreitet in der Prozess- und Energieindustrie.



Zum Produkt:



Visualisierung des Prozessleitsystems DeltaV™



Bohrlochkopf und Eruptionskreuz

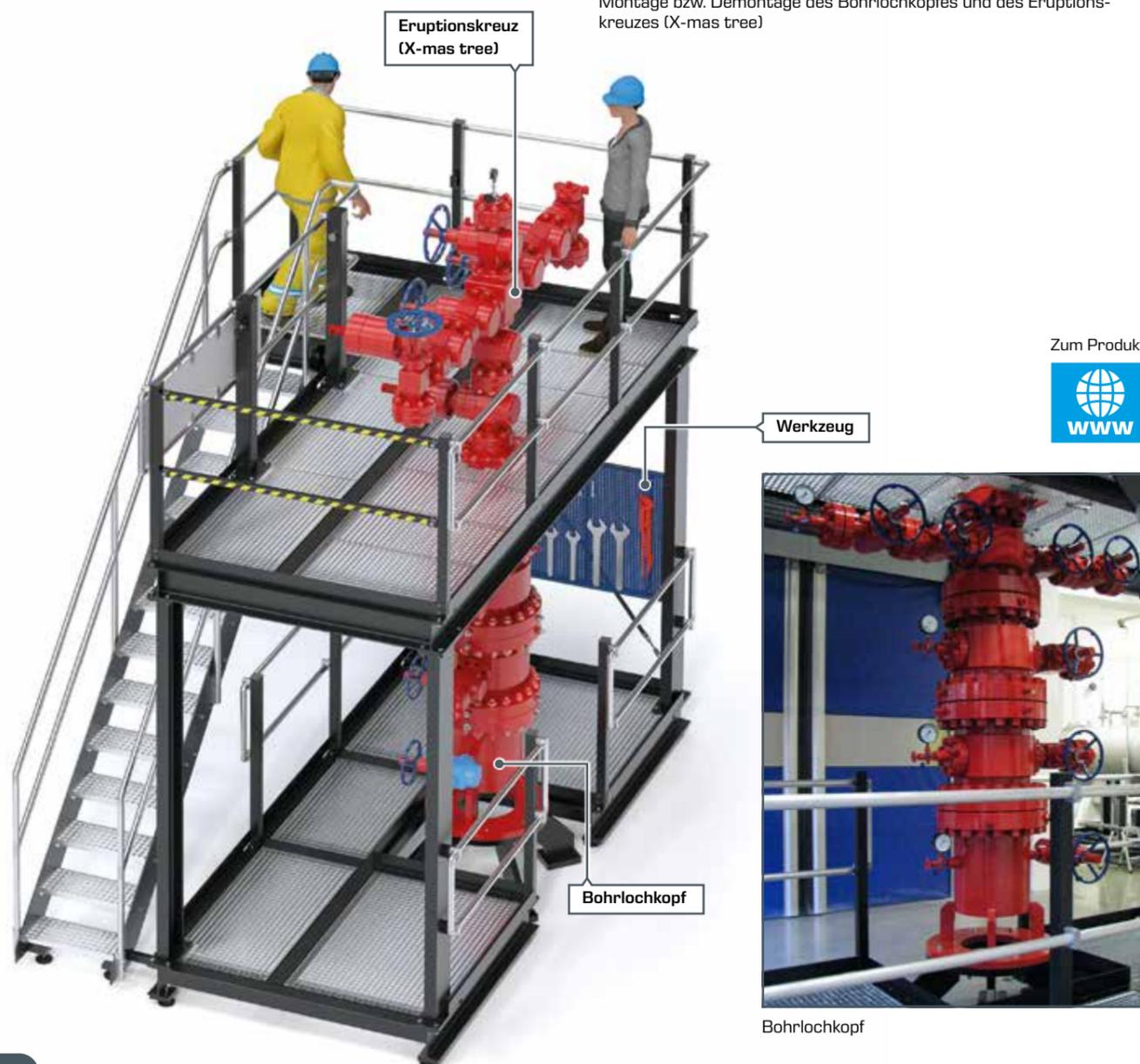
## WaXTMT Wellhead and Xmas-Tree Maintenance Trainer

In der Ölindustrie wird Rohöl aus einem Bohrloch gefördert und dann zur weiteren Verarbeitung gepumpt. Als Schnittstelle zwischen der Bohrausrüstung und Produktionsausrüstung ist an der Spitze der Ölquelle ein Bohrlochkopf installiert. An den Bohrlochkopf schließt sich ein Eruptionskreuz (Xmas-tree) mit Ventilen, Spulen und Armaturen für die Ölverarbeitung an.

WaXTMT zeigt den Aufbau eines Bohrlochkopfes und eines Eruptionskreuzes. Die Anlage dient zur Montage und Demontage des Bohrlochkopfes und des Eruptionskreuzes. Es werden keine Flüssigkeiten durch den Trainer gepumpt. Das für die Arbeiten erforderliche Werkzeug ist enthalten.



Montage bzw. Demontage des Bohrlochkopfes und des Eruptionskreuzes (X-mas tree)



## ET 805 Steam power plant

Die Dampfkraftanlage ET 805 ist speziell für Ausbildung und Training im Bereich Kraftwerkstechnik mit Prozessleitsystem konzipiert. Durch die Größe und Komplexität der Anlage entspricht das Betriebsverhalten in vielen Aspekten realer Großanlagen und ermöglicht damit eine praxisnahe Ausbildung.

Mit dieser Anlage können alle relevanten Eigenschaften eines Dampfturbinenkraftwerks untersucht werden. Das integrierte Prozessleitsystem ermöglicht es den Studierenden, den Betrieb eines automatisierten Kraftwerks zu üben. Alle für den Prozess wichtigen Größen werden übersichtlich in Prozessdiagrammen dargestellt und in Kennwerte umgerechnet.

Der Dampfkessel kann wahlweise mit Öl oder Gas betrieben werden. Der überhitzte Dampf wird einer einstufigen Industrieturbine mit Drehzahlregelung zugeführt. Dieser treibt einen Synchrongenerator an, der netzgekoppelt oder autark betrieben werden kann. Der Abdampf der Turbine wird kondensiert und dem Speisewasserkreislauf wieder zugeführt.

Die Anlage besteht aus vier getrennten Modulen und kann so den Platzverhältnissen im Labor flexibel angepasst werden:

Modul 1: Dampferzeuger mit Speisewasseraufbereitung

Modul 2: Dampfturbine mit Generator und Kondensator

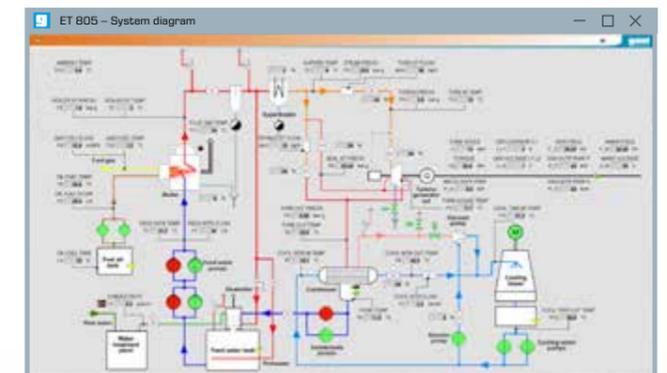
Modul 3: Nasskühlturm

Modul 4: Leitstand mit Prozessleitsystem

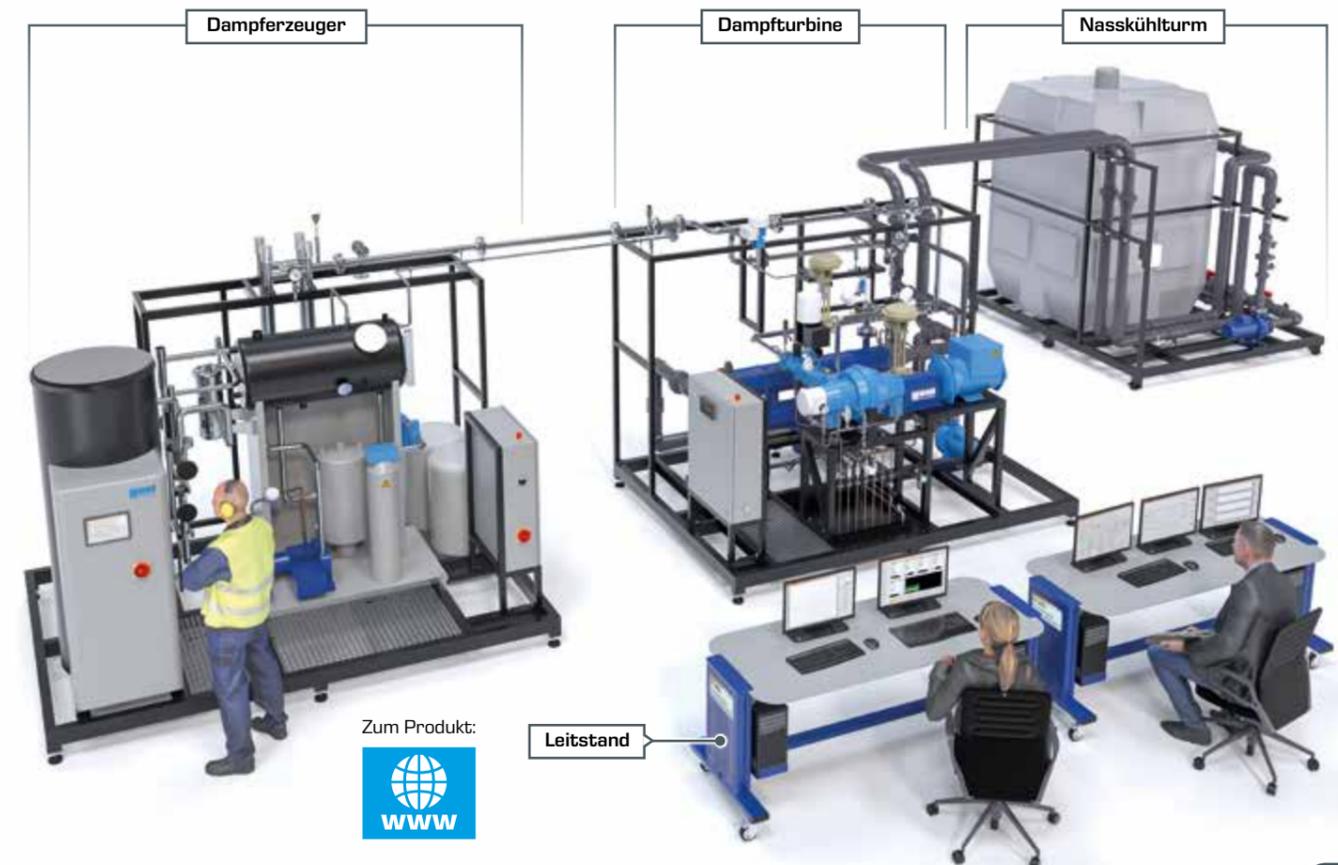
### Prozessleitsystem

Über das Prozessleitsystem wird der Betrieb der Anlage komplett überwacht und gesteuert. Die Bedienung erfolgt über moderne Touchscreen-Technologie am Leitstand. Die Messwerte werden sowohl an das Prozessleitsystem mit SPS gegeben, als auch an einen PC zur Datenerfassung geleitet, wo sie mit Hilfe der GUNT-Software dargestellt und ausgewertet werden.

Ein Sicherheitssystem sorgt bei kritischen Betriebszuständen für das Abschalten der betroffenen Komponenten und die Erfassung der Fehlerzustände.



Screenshot der Software



# Das GUNT-Gesamtprogramm – Systeme für die Technische Ausbildung



## Technische Mechanik und Konstruktionslehre

- Statik
- Festigkeitslehre
- Dynamik
- Maschinendynamik
- Konstruktionslehre
- Werkstoffprüfung



## Mechatronik

- Technisches Zeichnen
- Schnittmodelle
- Längenprüftechnik
- Maschinen- und Geräte-  
technik
- Fertigungstechnik
- Montagetechnik
- Instandhaltung
- Maschinenzustands-  
überwachung
- Automatisierung und  
Regelungstechnik



## Thermische Energietechnik

- Thermodynamische  
Grundlagen
- Thermodynamische  
Anwendungen in der  
Versorgungstechnik
- Regenerative Energien
- Thermische Fluid-  
energiemaschinen
- Kälte- und Klimatechnik



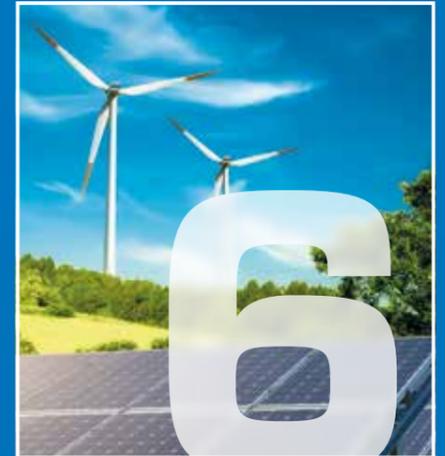
## Technische Strömungsmechanik

- Stationäre Strömung
- Instationäre Strömung
- Umströmung von Körpern
- Fluidenergiemaschinen
- Elemente aus dem Rohr-  
leitungs- und Anlagenbau
- Wasserbau



## Prozesstechnik

- Mechanische  
Verfahrenstechnik
- Thermische  
Verfahrenstechnik
- Chemische  
Verfahrenstechnik
- Biologische  
Verfahrenstechnik
- Pilotanlagen



## 2E Energy & Environment

- Energy**
  - Solarenergie
  - Wasserkraft und  
Meeresenergie
  - Windkraft
  - Biomasse
  - Geothermie
  - Energiesysteme
  - Energieeffizienz in der  
Gebäudetechnik
- Environment**
  - Wasser
  - Luft
  - Boden
  - Abfall

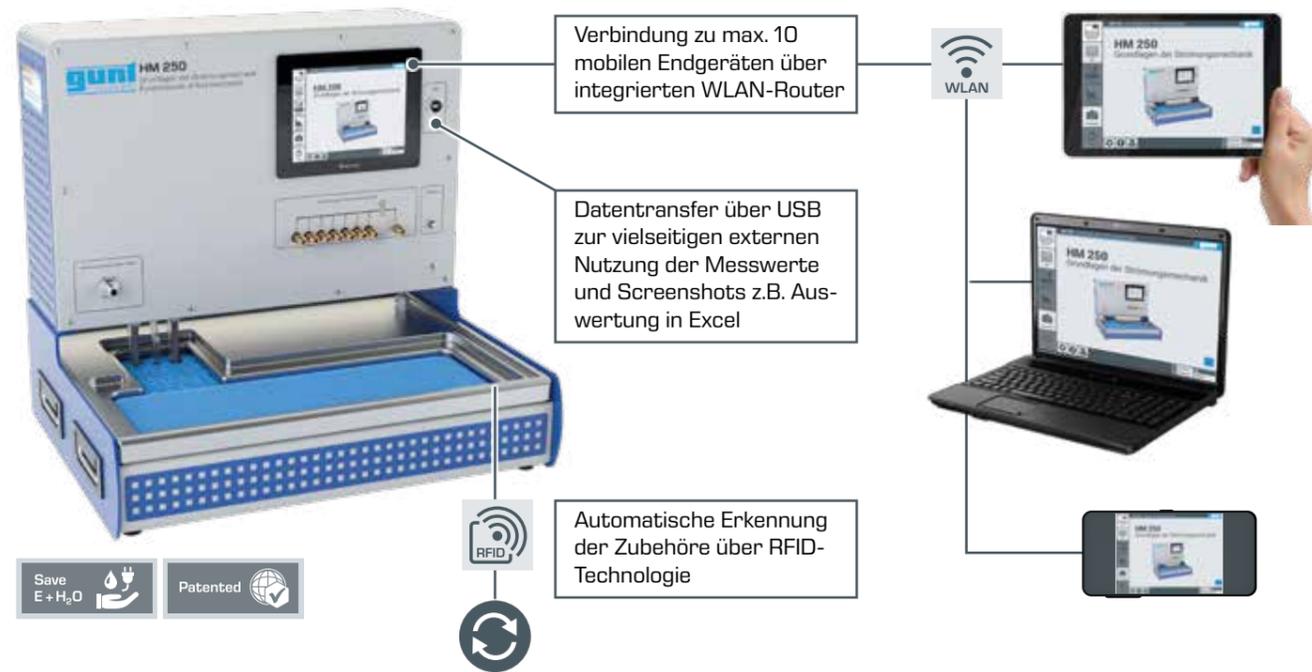
Planung und Beratung · Technischer Service  
Inbetriebnahme und Schulung

# HM 250 Grundlagen der Strömungsmechanik

Das digitale Lehr-Lern-Konzept bietet eine Interaktion zwischen realen Versuchen und digitaler Lehre mit Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung. Das Basismodul HM 250 stellt jeweils die Grundversorgung bereit. Mess-, Steuerungs- und

Regelungstechnik sowie die Kommunikationssysteme werden ebenso vom Basismodul bereitgestellt. Eine umfangreiche Auswahl an optional erhältlichen Zubehören ermöglicht einen kompletten Lehrgang in strömungsmechanischen Grundlagen.

## HM 250 Basismodul



## Reale Versuche – digitale Medien



Über das Screen-Mirroring können Studierende am Tablet die Versuchsvorbereitung und -durchführung verfolgen und ausreichend Abstand voneinander halten.

Im Laborregal HM 250.90 können die Zubehöre platzsparend und praktisch aufbewahrt werden.

- intuitive Versuchsdurchführung über Touchscreen (HMI)
- Gerätesteuerung mit einer SPS, über Touchscreen oder ein Endgerät bedienbar
- integrierter WLAN-Router für Bedienung und Steuerung über ein Endgerät und für Screen-Mirroring an bis zu 10 Endgeräten: PC, Tablet, Smartphone

- automatische Erkennung des Zubehörs über RFID-Technologie
- automatische Systemkonfiguration inklusiv Entlüften der Versuchsstrecken
- energie- und wassersparende Technik, platzsparender Aufbau

## Strömung in Rohrleitungen

- laminare / turbulente Strömung
- Einfluss der Reynolds-Zahl auf das Strömungsprofil
- visualisieren von Stromlinien mit elektrolytisch erzeugten Wasserstoffbläschen



HM 250.02  
Messung des Strömungsprofils



## Gesetze der Hydrodynamik

- Kontinuitätsgleichung und deren Einflussgrößen
- Impulssatz: Versuche mit Strahlkräften
- Wurfparabel: Untersuchung der Bahnkurve
- Bernoulli-Gesetz: Zusammenhang zwischen Drücken und Geschwindigkeit



HM 250.05  
Messung von Strahlkräften



HM 250.07  
Gesetz von Bernoulli



## Reibungsverluste in der Rohrströmung

- Widerstandsbeiwerte in versch. Rohrleitungselementen
- Zusammenhang zwischen Reynolds-Zahl und Rohrreibungszahl
- Verwendung des Moody-Diagramms
- Ausbildung der Strömung entlang der Einlaufstrecke

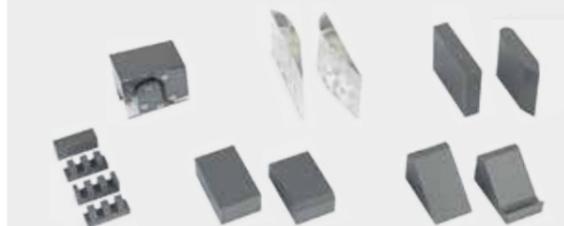


HM 250.09  
Grundlagen der Rohrreibung



## Strömung in offenen Gerinnen

- Energiehöhen des Wassers
- Wechselsprung
- Energiedissipation im Gerinne



Verschiedene magnetische Einbauten zur Demonstration der Strömung

# WL 110 Geräteserie

## Versuche zu Grundlagen der Wärmeübertragung



**WL 110**  
Versorgungseinheit

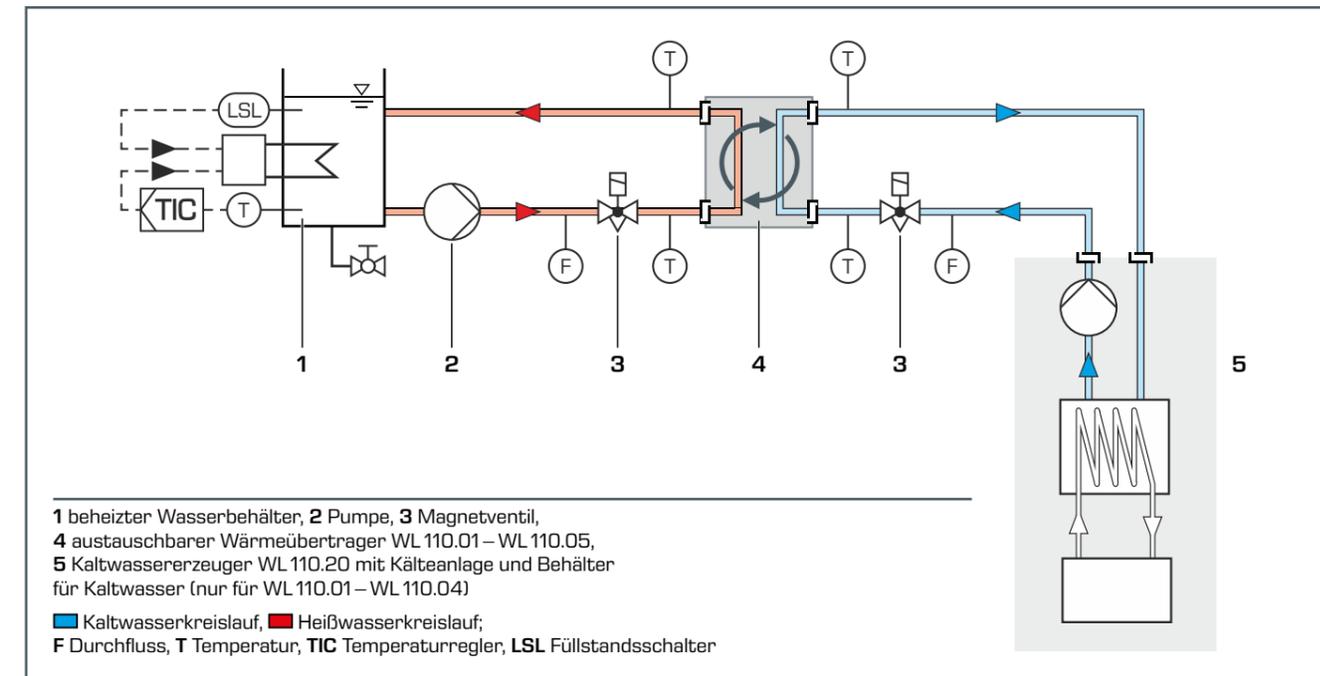
Die Versorgungseinheit erzeugt Heißwasser. Alle Messwerte werden am Touchscreen des Gerätes angezeigt und können über eine LAN/WLAN-Verbindung übertragen werden.

**WL 110.20**  
Kaltwassererzeuger

Mit dem optional erhältlichen Kaltwassererzeuger können die Wärmeübertrager bei geeigneten Versuchsbedingungen betrieben werden.



- automatische Erkennung des Zubehörs über RFID-Technologie
- energie- und wassersparende Technik, platzsparender Aufbau



Zum Produkt:



**WL 110.01**  
Doppelrohr-Wärmeübertrager

- einfache Bauform
- transparentes Außenrohr bietet einsehbaren Strömungsraum
- Gleich- oder Gegenstrombetrieb möglich



**WL 110.02**  
Platten-Wärmeübertrager

- kompakte Bauform
- Gleich- oder Gegenstrombetrieb möglich



**WL 110.03**  
Rohrbündel-Wärmeübertrager

- transparentes Mantelrohr
- Medien strömen im Kreuzgegen- und Kreuzgleichstrom



**WL 110.04**  
Rührbehälter mit Doppelmantel und Rohrschlange

- Heizen mit Mantel oder mit Rohrschlange
- Rührwerk zur besseren Vermischung des Mediums



**WL 110.05**  
Rippenrohr-Wärmeübertrager

- Wärmeübertragung zwischen Wasser und Luft im Kreuzstrom
- Vergrößerung der wärmeübertragenden Oberfläche durch Rippen auf den Rohren

## Produktübersicht

CE		
CE 100	Strömungsrohrreaktor	154
CE 110	Diffusion in Flüssigkeiten und Gasen	132
CE 115	Grundlagen der Sedimentation	023
CE 116	Kuchen- und Tiefenfiltration	043
CE 117	Durchströmung von Partikelschichten	044
CE 130	Konvektionstrocknung	090
CE 200	Fließeigenschaften von Schüttgütern	074
CE 210	Ausfließen von Schüttgut aus Silos	072
CE 220	Wirbelschichtbildung	078
CE 222	Vergleich von Wirbelschichten	080
CE 225	Hydrozyklon	040
CE 235	Gaszyklon	038
CE 245	Kugelmühle	059
CE 250	Pneumatische Förderung	082
CE 255	Rollagglomeration	068
CE 264	Siebmaschine	016
CE 275	Windsichtung	014
CE 280	Magnetscheidung	018
CE 282	Tellerzentrifuge	036
CE 283	Trommelzellenfilter	048
CE 284	Saugnutsche	050
CE 285	Suspensionsbereiter	052
CE 286	Drucknutsche	051
CE 287	Rahmenfilterpresse	046
CE 310	Versorgungseinheit chemische Reaktoren	140
CE 310.01	Kontinuierlicher Rührkesselreaktor	142
CE 310.02	Strömungsrohrreaktor	144
CE 310.03	Rührkesselkaskade	146
CE 310.04	Diskontinuierlicher Rührkesselreaktor	148
CE 310.05	Reaktor mit Kolbenströmung	150
CE 310.06	Reaktor mit laminarer Strömung	152

CE 320	Rühren	062
CE 322	Rheologie und Mischgüte eines Rührbehälters	066
CE 380	Festbettkatalyse	160
CE 380.01	Fließinjektionsanalyse	162
CE 400	Gasabsorption	108
CE 405	Fallfilmabsorption	110
CE 520	Kühlungskristallisation	120
CE 530	Umkehrosmose	122
CE 540	Adsorptive Lufttrocknung	112
CE 579	Tiefenfiltration	056
CE 583	Adsorption	116
CE 584	Erweiterte Oxidation	168
CE 587	Druckentspannungsfotation	030
CE 588	Demonstration der Druckentspannungsfotation	032
CE 600	Kontinuierliche Rektifikation	098
CE 602	Diskontinuierliche Rektifikation	100
CE 610	Vergleich von Rektifikationskolonnen	102
CE 620	Flüssig-Flüssig-Extraktion	126
CE 630	Fest-Flüssig-Extraktion	128
CE 640	Biotechnische Herstellung von Ethanol	196
CE 642	Biogasanlage	200
CE 650	Biodieselanlage	164
CE 701	Biofilmverfahren	176
CE 702	Anaerobe Wasserbehandlung	190
CE 704	SBR-Verfahren	178
CE 705	Belebtschlammverfahren	182
CE 715	Steigfilmverdampfung	092
CE 730	Airlift-Reaktor	186

HM		
HM 142	Sedimentation in Absetzbecken	026
HM 250	Grundlagen der Strömungsmechanik	218
HM 250.01	Visualisierung der Rohrströmung	218
HM 250.02	Messung des Strömungsprofils	218
HM 250.03	Visualisierung von Stromlinien	218
HM 250.04	Kontinuitätsgleichung	218
HM 250.05	Messung von Strahlkräften	218
HM 250.06	Freier Ausfluss	218
HM 250.07	Gesetz von Bernoulli	218
HM 250.08	Verluste in Rohrleitungselementen	219
HM 250.09	Grundlagen der Rohrreibung	219
HM 250.10	Druckverlauf entlang der Einlaufstrecke	219
HM 250.11	Offenes Gerinne	219

MT		
MT 174	Sortieranlage	017

WL		
WL 110	Versorgungseinheit Wärmeübertrager	220
WL 110.01	Doppelrohr-Wärmeübertrager	220
WL 110.02	Platten-Wärmeübertrager	220
WL 110.03	Rohrbündel-Wärmeübertrager	220
WL 110.04	Rührbehälter mit Doppelmantel und Rohrschlange	221
WL 110.05	Rippenrohr-Wärmeübertrager	221
WL 110.20	Kaltwassererzeuger	220
WL 420	Wärmeleitung in Metallen	222
WL 422	Wärmeleitung in Fluiden	222
WL 430	Wärmeleitung und Konvektion	222
WL 440	Freie und erzwungene Konvektion	223
WL 460	Wärmeübertragung durch Strahlung	223

Pilotanlagen		
ET 805	Steam power plant	215
IPP	Integrated Pilot Plant	204
IUI	Industrial Unit for Inspection	210
MMTS	Mechanical Maintenance Training Skid	208
MPTR	Main Process Training Rig	209
PPT	Process Pump Trainer	211
PST	Phase Separation Trainer	212
WaXTMT	Wellhead and Xmas-Tree Maintenance Trainer	214
WaXTOT	Wellhead and Xmas-Tree Operation Trainer	213



# Kontakt

**G.U.N.T. Gerätebau GmbH**  
Hanskampring 15 -17  
22885 Barsbüttel

+49 40 67 08 54 -0  
sales@gunt.de  
www.gunt.de



Besuchen Sie uns  
im Internet unter  
[www.gunt.de](http://www.gunt.de)

