



HOCHSCHULE MERSEBURG & ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH

FACHBEREICH INGENIEUR- UND NATURWISSENSCHAFTEN

Bachelorarbeit

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES
BACHELOR OF ENGINEERING (B. ENG.)

Thema:

**Technische Planung der dosierten Förderung eines
hochviskosen Verdickungsmittels**

eingereicht von:

Roman-Luca Zank

Betreuer: Prof. Dr. nat. techn. Ulf Schubert
Stefan Münch, B.Eng.

Kontakt: romanzank@mail.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Zielsetzung und Abgrenzung der Aufgabenstellung	7
2.1	Zielsetzung der Aufgabenstellung	7
2.2	Abgrenzung der Aufgabenstellung	7
3	Theoretische Grundlagen	7
3.1	Definition und Gliederung zu Verdickungsmitteln	7
3.2	Dosierung von Flüssigkeiten	9
3.2.1	Charakterisierung des Dosierstroms	9
3.2.2	Dosierpumpen	12
3.2.3	Ermittlung des Dosierstroms	15
3.3	Stand der Technik zur Dosierung hochviskoser Verdickungsmittel . . .	17
3.4	Chemische Produktion und Prozesssicherheit	17
3.4.1	Produktionsweisen in der Chemie	17
3.4.2	Industrielle Gebinde für Flüssigkeiten	18
3.4.3	Sicherheit von Chemieanlagen	18
3.5	Allgemein heuristische Entscheidungsverfahren	19
3.6	Technische Planung	19
3.6.1	R&I- Fließbild	19
3.6.2	Rohrleitungsplanung	19
3.6.3	Signalverarbeitungsplanung	19
4	Material und Methoden	19
4.1	Ist-Analyse	19
4.1.1	Aktuelles Dosierv Verfahren	19
4.1.2	Produktionsweise	19
4.2	Rechnerische Auslegung	19
4.2.1	Berechnung des Druckverlustes für verschiedene Leitungs- durchmesser	19
4.2.2	Rohrleitungsklassifizierung nach PAS 1057	19
4.3	Fachgespräche und Angebotsanfragen	19
4.4	Experimentelle Untersuchungen	19
4.4.1	Ermittlung der Viskosität nach DIN EN ISO 2555	19
4.4.2	Erwärmungsverhalten	21
4.4.3	Verdünnungsverhalten	21
4.4.4	Pumpversuche	21
4.5	Nutzwertanalyse	21
4.5.1	Erarbeitung von Lösungsvarianten	21
4.5.2	Festlegen und gewichten von Entscheidungskriterien	21
4.5.3	Bewertung der Lösungsvarianten	21
4.5.4	Gesamtbeurteilung der Varianten	21
4.6	Computerunterstütztes Zeichnen von Plänen	21
4.6.1	Software: AutoCAD	21
4.7	Gefährdungsbeurteilung (HAZOP-Verfahren)	21

5	Ergebnisse	21
5.1	Ist-Zustand der Verdickungsmitteldosierung	22
5.1.1	Aktuelles Dosiervverfahren	22
5.1.2	Produktionsweise	22
5.2	Eigenschaften des Verdickungsmittels	22
5.2.1	Viskositätsmessungen	22
5.2.2	Verdünnungsverhalten	22
5.2.3	Erwärmungsverhalten	22
5.3	Entscheidung für Gebindetyp	22
5.3.1	Angebotsanfrage	22
5.3.2	Entscheidungsverfahren	22
5.4	Entscheidung für Pumpentyps und Leitungsdurchmessers	22
5.4.1	Berechnung des Druckverlustes	22
5.4.2	Literaturarbeit	22
5.4.3	Fachgespräche und Angebotsanfrage	23
5.4.4	Pumpversuche	23
5.4.5	Entscheidungsverfahren	23
5.5	Entscheidung für Messverfahren	23
5.5.1	Literaturarbeit	23
5.5.2	Fachgespräche und Angebotsanfrage	23
5.5.3	Entscheidungsverfahren	23
5.6	Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung	23
5.6.1	R&I- Fließbild der Verdickerdosierung	23
5.6.2	Theoretische Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung	23
5.6.3	Signalverarbeitungsplanung der Verdickerdosierung	23
5.7	Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickmitteldosierung	23
6	Diskussion	23
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	23
	Literaturverzeichnis	25
	Abbildungsverzeichnis	26
	Tabellenverzeichnis	26

Danksagung

Kurzfassung

Abstract

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Seminararbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderem Prüfungsgremium vorgelegen.

Merseburg, den 07.02.2022

Unterschrift:_____

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne vertrauliche Informationen der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Ganzen oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften – auch in digitaler Form - sind ab dem Abgabedatum der Arbeit untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH. Die Einsichtnahme ist nur dem Verfasser und dem Betreuer zu erlaubt.

Merseburg, den 07.02.2022

1 Einleitung

In der produzierenden Chemie sind eine Reihe von Verfahrensschritten notwendig um das gewünschte Zielprodukt herzustellen. Für die Produktion von Polymerdispersionen der Farben-, Lack- und Beschichtungsindustrie ist das Fördern von Basischemikalien wie organischen und anorganischen Säuren und Basen, Lösemitteln, Initiatoren, Emulgatoren und Additiven elementar. Gerade Additive werden oft in geringen Mengen mit hoher Wirksamkeit eingesetzt, weshalb das Verfahren der Dosierung anzuwenden ist.

2 Zielsetzung und Abgrenzung der Aufgabenstellung

2.1 Zielsetzung der Aufgabenstellung

Für die Herstellung der Acrylat-Copolymerdispersion AC 548 ist die Zugabe eines assoziativen Verdickermittels für die Alberdingk Boley Leuna GmbH als Prozessschritt nötig. Dieses Verdickermittel wird zugegeben, um die Viskosität der hergestellten, wässrigen Polymerlösung zu erhöhen und damit die rheologischen Eigenschaften für die Verwendung in Buntsteinputzen, Lacken und Farben sicherzustellen. Das derzeit genutzte Verdickermittel macht es möglich, dass die Zugabe durch einen Abwiegeprozess und einem Fass als Dosierbehälter erfolgen kann. Diese Art der Dosierung erfordert jedoch eine gewisse Fließfähigkeit des zuzugebenden Mediums und die Akzeptanz einer kaum quantifizierten Dosierung. Weiterhin wird Personalzeit für Abwiege- und Transportprozesse benötigt.

Im Rahmen der Produktion soll diese Form der Dosierung technisch umgesetzt werden, um somit Personalzeit zu sparen, den Verbrauch an Verdickermittel gering zu halten und das Handling zu erleichtern. Aufgrund der Einstellung der Produktion für das derzeit verwendete Verdickermittel Rheobyk-H 3300 VF der BYK-CHEMIE GMBH wird dieses in Zukunft durch TAFIGEL PUR 85 der MÜNZING CHEMIE GMBH ersetzt. Dabei unterscheiden sich beide Verdickermittel grundlegend in ihrer Verarbeitbarkeit. Gerade das neu einzuführende Verdickermittel stellt durch seine hochviskosen Eigenschaften eine Herausforderung für den Dosierprozess dar.

Ziel dieser Arbeit ist es durch Charaktisierung des neuen Verdickermittels verschiedene Möglichkeiten der Dosierung zu recherchieren und zu diskutieren. Infolgedessen soll ein Konzept der Dosierung technisch geplant werden, welches den Forderungen des Unternehmens entspricht. Ausgewählte Aspekte sind beispielsweise die Dosiergenauigkeit und das Handling durch die Produktion.

2.2 Abgrenzung der Aufgabenstellung

In Abgrenzung zur Aufgabenstellung wird in dieser Arbeit kein Bezug zur realen Umsetzung des vorgestellten Konzeptes genommen. Es werden lediglich Betrachtungen und Möglichkeiten der Dosierung zusammengestellt und diskutiert. Diese Arbeit soll dabei ein gesamtheitliches Bild der Problematik zeichnen und mögliche Lösungen hierfür aufzeigen. Die Entscheidung ob das näherbeschriebene Konzept tatsächlich umgesetzt wird, bleibt an dieser Stelle dem betreuenden Unternehmen überlassen. Somit finden Aspekte der Inbetriebnahme oder Testreihen einer umgesetzten Dosierstation für diese Arbeit keine Bedeutung.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Definition und Gliederung zu Verdickungsmitteln

In der Farben- und Putzindustrie werden Verdickungsmittel als rheologische Additive bezeichnet. Sie erhöhen die Viskosität von Flüssigkeiten und ändern somit ihre rheologischen Eigenschaften, welche die Auftragungs-, Fließ- und Verlaufseigenschaften von Farben und Putzen bestimmen. Verdickungsmittel kommen jedoch auch in der Lebensmittelchemie oder Pharmazie zum Einsatz.

Je nach dem welche Anforderungen an das Verdickermittel gestellt werden, unterscheiden sich diese in ihrer Zusammensetzung (siehe Abb. 1). [BRRS09]

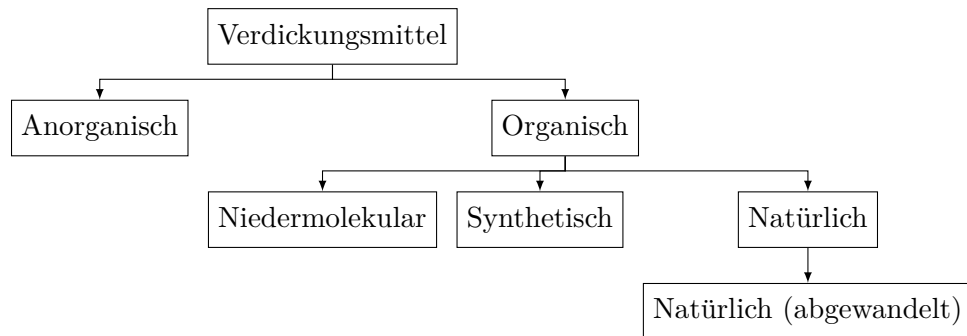


Abb. 1: Einteilung von Verdickungsmitteln nach Zusammensetzung [BRRS09]

Je nach Verdickungsmittel können verschiedene Effekte wie Gelbildung, Solvation, Ausbildung von Netzstrukturen, Coulomb-Kräfte, Quellung und Wasserstoff-Brückenbindungen, sowie deren gegenseitige Einflussnahme die Erhöhung der Zähflüssigkeit bewirken. [BRRS09]

Betrachtet man speziell die sogenannten assoziativen Verdickungsmittel lassen sich diese den Gruppen der abgewandelten, natürlichen Verdicker und den synthetischen Verdickern zuordnen. Sie spezifizieren sich gegenüber anderen Verdickertypen darin, dass sie neben hydrophilen Gruppen auch hydrophobe End- und Seitengruppen enthalten, welche dem Verdickungsmittel einen Tensidcharakter verleihen. Deshalb bestehen assoziative Verdicker unter anderem aus hydrophob modifizierten Polymerstrukturen (siehe Abb. 2).

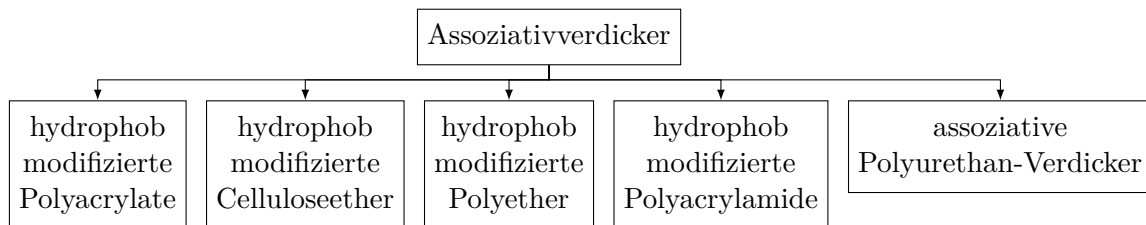


Abb. 2: Einteilung von Assoziativ-Verdickern nach chemischer Struktur [BRRS09]

Diese strukturelle Eigenschaft der Assoziativ-Verdicker macht die Bildung von Micellen möglich und es treten neben der Quellung in der Wasserphase sogenannte „Micellbrücken“ zwischen Latex-Teilchen der Bindemitteldisperion auf, welche eine zusätzlich Viskositätserhöhung bewirken. [BRRS09]

In Abbildung 3 ist eine schematische Struktur eines solchen assoziativen Polyurethan-Verdickers aufgeführt. Diese beispielhafte Struktur zeigt hydrophile, höher molekulare Polyethersegmente, welche über Urethan-Gruppen verbunden sind und durch hydrophobe Molekülgruppen verknüpft werden. [BRRS09]

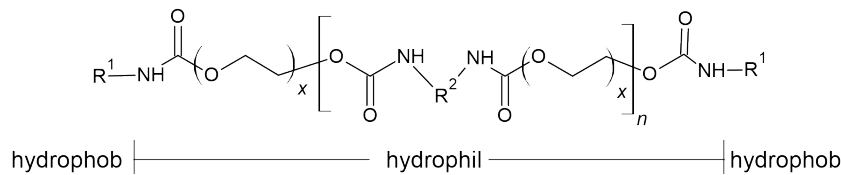


Abb. 3: schematische Struktur eines assoziativen Polyurethan-Verdickers, erstellt nach [BRRS09]

Durch diesen Mix der hydrophoben und hydrophilen Strukturen wird der Tensidcharakter des Verdickungsmittels bestimmt und es ergeben sich Netzstrukturen mit assoziierten „Micellbrücken“, wie in Abbildung 4 dargestellt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass auch Wechselwirkungen mit bereits vorhandenen Tensidmolekülen in der Dispersion auftreten können und die Struktur somit weiter stabilisieren. [Mez16]

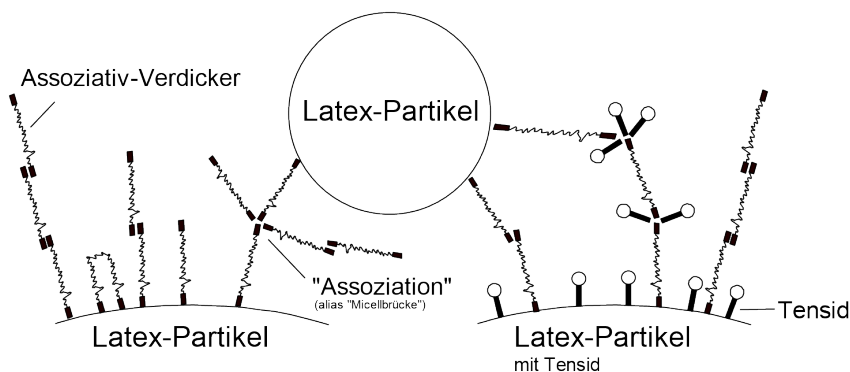


Abb. 4: Netzstruktur durch Verdickermittel in Latex-Dispersion (mit und ohne Tensid), erstellt nach [Mez16]

Aufgrund dieser ausgeprägten Netzstrukturen innerhalb des Verdickungsmittels ist es jedoch auch möglich, dass das Verdickungsmittel selbst eine hohe Viskosität aufweist. Dieser Punkt kann erheblichen Einfluss auf die großtechnische Verarbeitbarkeit des Additives haben und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher betrachtet.

3.2 Dosierung von Flüssigkeiten

3.2.1 Charakterisierung des Dosierstroms

Um den Dosierstrom einer Flüssigkeit charakterisieren, ist es zunächst nötig die Fließeigenschaften beschreiben zu können. Die Wissenschaft der Rheologie beschäftigt sich unter anderem mit dem Fließ- und Deformationsverhalten von Flüssigkeiten und teilt diese zunächst in NEWTONSCHE und NICHTNEWTONSCHE Fluide ein. Grundlage dieser Einteilung sind Untersuchungen von ISAAC NEWTON, welcher sich bei konstanter Temperatur mit der Schergeschwindigkeit D in Abhängigkeit von der Schubspannung τ beschäftigte. Das Ergebnis dieser Arbeit ist das NEWTONSCHE FLIESSGESETZ unter Gleichung (1), welche den Fließwiderstand η einer Flüssigkeit bei gegebener Temperatur als Stoffkonstante benennt. Dieser Fließwiderstand η ist heute unter der Bezeichnung der dynamischen Viskosität bekannt.

$$\tau = \eta \cdot D \quad (1)$$

D ... Schergeschwindigkeit
 τ ... Schubspannung
 η ... Dynamische Viskosität

Es sei erwähnt, dass neben der dynamischen Viskosität auch eine kinematische Viskosität ν existiert. Diese beschreibt in Gleichung (2) jedoch lediglich das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität und der Dichte eines Fluides.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

ν ... kinematische Viskosität
 ρ ... Dichte
 η ... Dynamische Viskosität

Schlussendlich gilt für die Einteilung der Fluide nach Gleichung (1), dass alle Fluide, welche eine Linearität zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung ohne Fließgrenze aufweisen als NEWTONSCHE Fluide und diejenigen, die ein nicht-lineares Verhalten und/oder ein Verhalten mit Fließgrenze aufweisen als NICHTNEWTONSCHE Fluide eingeordnet werden. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 5 mit einer Auswahl an verschiedenen Rheologieprofilen.

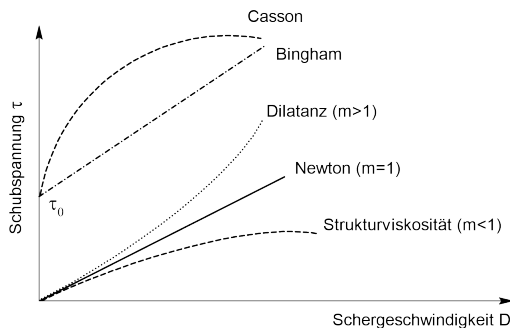


Abb. 5: Fließkurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Hol10]

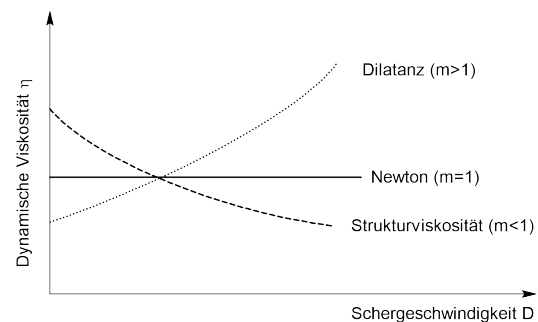


Abb. 6: Viskositätskurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Mun18]

Zur Bestimmung der Viskosität müssen für ein NEWTONSCHES Fluid laut Gleichung (1) die Schergeschwindigkeit D und die Schubspannung τ bestimmt werden. Eine Möglichkeit hierfür ist die Nutzung eines sogenannten Rotationsviskosimeters. Allgemein beschreiben Rotationsviskosimeter einen Viskosimetertypen, bei dem die zu messende Flüssigkeit zwischen spezifisch geformten Körpern gebracht wird, von denen einer rotiert. Dabei tritt eine Scherung der Flüssigkeit auf und das aufgewendete Drehmoment am Viskosimeter wird gemessen. Neben Rotationsviskosimetern sind auch weitere Viskosimetertypen wie Kapillarviskosimeter und Fallkörperviskosimeter bekannt. Diese unterscheiden sich neben dem Aufbau gegenüber dem Rotationsviskosimeter beispielsweise auch darin, dass sie im Regelfall die Viskosität von NICHTNEWTONSCHEN Fluiden nicht ausreichend untersucht werden kann. [RRM08]

Nachdem die Viskosität bestimmt ist, lässt sich nun der Dosierstrom des Verdickermittels entsprechend seiner Strömungseigenschaften beschreiben. Hier für wird die sogenannte REYNOLDSZAHL bestimmt. Sie ist eine dimensionslose Kennzahl und beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheitskräften zu Reibungskräften in strömenden Flüssigkeiten und ist für durchströmte Rohrleitungen unter Gleichung (3) definiert. [Fot14]

$$Re = \frac{d_H \cdot \rho \cdot \bar{u}}{\eta} \quad (3)$$

Re ... REYNOLDSZAHL

η ... dynamische Viskosität des Fluids

ρ ... Dichte des Fluids

d_H ... hydraulischer Rohrdurchmesser

\bar{u} ... mittlere Strömungsgeschwindigkeit

Anhand der REYNOLDSZAHL lässt sich nun mithilfe der Tabelle 1, die jeweilige Strömungsform zuordnen. Diese Zuordnung ist wichtig, da sich je nach Strömungsform unterschiedliche Einflussgrößen auf den Druckverlust somit auf die Auslegung der Dosierung ergeben. Beispielsweise hat für eine laminare Strömung die Wandrauigkeit der Leitung keinen Einfluss mehr, wohin gegen sie in turbulenten Strömungen maßgebliche Druckverluste hervorrufen kann. In laminaren Strömungen überwiegt hierbei der glättende Einfluss der Viskosität gegenüber den Rohronebenheiten, während in turbulenten Strömungen weitere Wirbel erzeugt werden. [Bsc18]

Tab. 1: Strömungsformen und ihre Reynoldszahlen [Fot14]

Strömungsform	Laminar	instabiler Bereich	Turbulent
Reynoldszahl	< 2300	2300 bis 4000	> 4000

Nach der Bestimmung der Reynoldszahl lässt sich nun mit Hilfe des NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramms, nachfolgend MOODY-Diagramm genannt, die Rohrreibungszahl λ bestimmen (siehe Abb. 7). Diese Rohrreibungszahl ist eine dimensionslose Kennzahl und kann zweckmäßig in Gleichung (4) eingesetzt werden. Somit ist es möglich den dimensionslosen Druckverlustbeiwert ζ_R für gerade Rohrleitungen zu bestimmen und ermöglicht daraufhin die Berechnung des durch Reibung verursachten Druckverlustes Δp auf Basis der erweiterten BERNOULLI-Gleichung (5). [Bsc18]

$$\zeta_R = \lambda \cdot \frac{L}{d} \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \zeta_R \cdot \rho \cdot \bar{u}^2 \quad (5)$$

ζ_R ... Druckverlustbeiwert für gerade Rohrstrecken

L ... Rohrleitungslänge

d ... Rohrdurchmesser

Δp ... Druckverlust

ρ ... Dichte des Fluids

\bar{u} ... mittlere Strömungsgeschwindigkeit

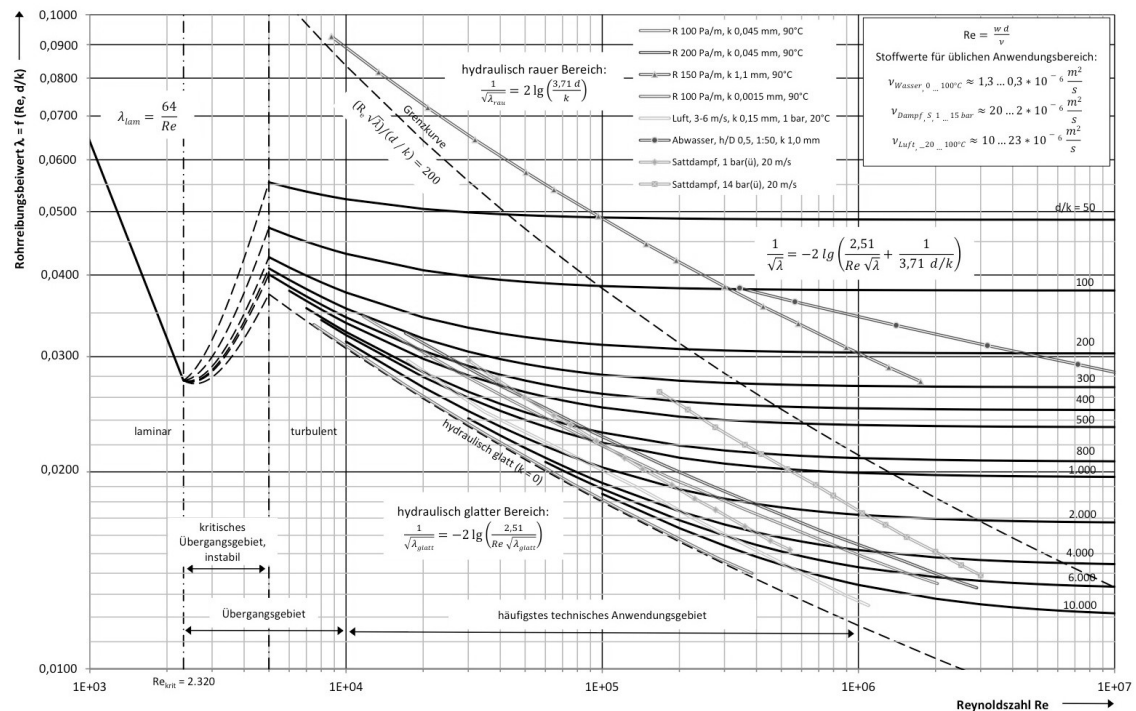


Abb. 7: NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramm [Msi17,]

Liegt für eine nicht-kompressible Flüssigkeit eine laminare Strömung vor, so ist es möglich die zuvor beschriebene Vorgehensweise zu vereinfachen und den auftretenden Druckverlust in einer geraden Rohrleitung direkt mit dem Gesetz von HAGEN-POISEUILLE zu bestimmen. Der Druckverlust wird hierbei in Abhängigkeit vom Volumenstrom, der Rohrleitungslänge, des Rohrdurchmessers und der Viskosität berechnet. Die Definition des Gesetzes, aufgelöst nach dem Druckverlust, findet sich unter Gleichung (6). [Fot05]

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{r^4 \cdot \pi} \quad (6)$$

Δp ... Druckverlust

η ... dynamische Viskosität des Fluids

\dot{V} ... Volumenstrom des Fluids

r ... innerer Radius der Rohrleitung

L ... Rohrleitungslänge

Da das Gesetz von HAGEN-POISEUILLE bereits im MOODY-Diagramm enthalten ist, können beide Vorgehensweisen genutzt werden um die jeweils andere Rechnung zu überprüfen. Sollen Rohrleitungseinbauten wie Armaturen, Ventile oder Bogenstücke einberechnet werden, vereinfacht jedoch aufgrund von tabellierten Druckverlustbeiwerten möglicher Einbauten die erweiterte BERNOULLI-Gleichung die Berechnung des gesamten reibungsbedingten Druckverlustes.

3.2.2 Dosierpumpen

Da Flüssigkeiten keine hohen Abweichungen der Dichte in Abhängigkeit von geringen Druck- und Temperaturschwankungen aufzeigen, kann selbst eine volumenbegrenzte

Dosierung sehr genau sein. Durch die fest definierten Abgrenzungsräume („Kammern“) wird eine solche volumenbegrenzte Flüssigkeitsdosierung in aller Regel mit rotierenden oder oszillierenden Verdränger-Dosierpumpen umgesetzt. Sie zeichnen sich im Vergleich zu Kreispumpen dadurch aus, dass die Förderhöhe weitestgehend unabhängig vom Förderstrom ist. Da je nach Dreh- oder Hubzahl ein festes Volumen gefördert wird, eignen sie sich gut, wenn ein Dosierverfahren ohne weitere Messeinrichtung vorausgesetzt wird. Dennoch lassen Sie sich auch mit verschiedenen Messverfahren kombinieren, um so die Dosierung so genau wie möglich zu gestalten. Eine genaue Definition für den realen Förderstrom von Verdrängerpumpen findet sich unter Gleichung 7. [Ign15, Vet02]

$$\dot{m} = i \cdot V_K \cdot n \cdot \rho \cdot \eta_V \quad (7)$$

\dot{m} ... Fördermassenstrom
 i ... Anzahl der verdrängbaren „Kammern“
 V_K ... Kammervolumen
 n ... Drehzahl bzw. Hubfrequenz
 ρ ... Dichte der Flüssigkeit
 η_V ... volumetrischer Wirkungsgrad

Da in der Realität die rein geometrische Volumenabgrenzung durch die „Kammern“ der Pumpe vom messbaren Förderstrom abweicht wird in Gleichung (7) der volumetrische Wirkungsgrad η_V als Korrekturfaktor genutzt. Dieser unter Gleichung (8) definierte Wirkungsgrad wird von den Eigenschaften des Fluids, sowie von den Betriebsbedingungen und beschreibt dabei das Verhältnis zwischen dem realen Förderstrom \dot{V} und dem theoretisch, geometrischen Förderstrom \dot{V}_{theo} . [Vet02]

$$\eta_V = f(\Delta p, \rho, \nu, E_{\text{geo}}) = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\text{theo}}} \quad (8)$$

\dot{V} ... realer Volumenstrom
 \dot{V}_{theo} ... theoretischer Volumenstrom
 Δp ... Differenzdruck
 ν ... kinematische Viskosität der Flüssigkeit
 ρ ... Dichte der Flüssigkeit
 E_{geo} ... pumpenspezifische Geometrie

Verursacht werden diese Abweichungen vom theoretischen Förderstrom durch Leckage- und Elastizitätseinflüsse, welche hauptsächlich durch den von der Pumpe geforderten Differenzdruck entstehen. Der Arbeitsraum der Dosierpumpe ist daher so starr und dicht wie möglich auszuführen. Da neben den Fluid- und den Betriebsbedingungen auch die Bauart bzw. die Pumpengeometrie Einfluss auf den volumetrischen Wirkungsgrad nimmt, ist es wichtig sich genauer mit den verschiedenen Arten der Verdrängungspumpen auseinanderzusetzen. Auch Einflüsse, die die Einbindung und Handhabung in der Produktion betreffen, können entscheidend für die Wahl des Pumpentyps sein.

Zum einen gibt es die Kategorie der oszillierenden Dosierpumpen. Diese Pumpen kennzeichnen sich dadurch, dass sie ein Fluid durch Hubbewegungen

eines Verdängerkörpers fördern. Dieser verdrängende Körper kann bei einer klassischen Pumpe ein zylindrischer Kolben sein, jedoch sind heutzutage vorrangig Membranpumpen im Einsatz bei der das Fördermedium durch eine spezielle Membran getrennt ist (vgl. Abbildungen 8 und 9).

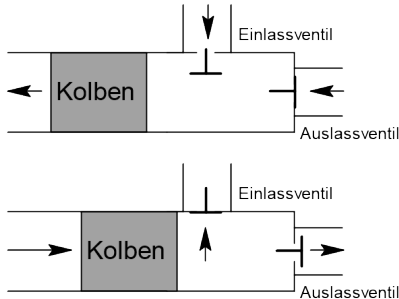


Abb. 8: Skizze einer Kolbenpumpe

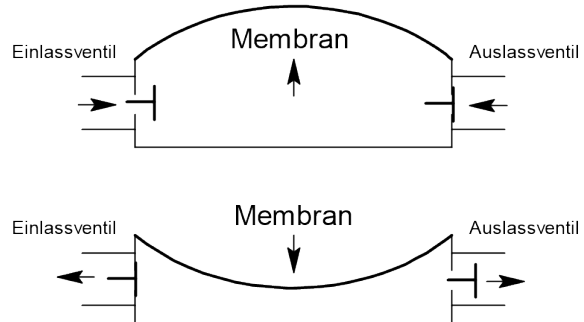


Abb. 9: Skizze einer Membranpumpe

Die im Betrieb nutzbaren Stellgrößen bei diesen Pumpen konzentrieren sich aufgrund ihrer Funktionsweise auf die Hublänge und die Hubfrequenz. Durch den geometrisch genau definierten Hubraum und weitestgehend Leckfreien Pumpenventilen und Kolbenabdichtungen, eignen sich oszillierende Dosierpumpen am günstigsten für die Flüssigkeitsdosierung. Durch das Hubweise fördern der Flüssigkeit ergibt sich jedoch ein digitaler Charakter im Förderstrom. Somit eignen sich diese Pumpen lediglich für diskontinuierliche Dosierung mittels Hubzählung. Der Massenstrom der sich daraus für eine einzylindrige Kolbenpumpe ergibt, ist unter Gleichung (9) zu finden. [Vet02]

$$\dot{m} = h_K \cdot A_K \cdot n \cdot \rho \cdot \eta_V \quad (9)$$

\dot{m} ... Fördermassenstrom
 h_K ... Hublänge
 A_K ... Kolbenquerschnitt
 n ... Hubfrequenz
 ρ ... Dichte der Flüssigkeit
 η_V ... volumetrischer Wirkungsgrad

Die Kategorie der rotierenden Dosierpumpen ist im Vergleich zu oszillierenden Dosierpumpen deutlich fassettenreicher. Das hierbei genutzte Verdrängervolumen basiert auf Maßtoleranzen, Spaltmaßen und Elastizitäten des Pumpraumes, welches durch Rotation der Verdrängersystems gefördert wird. Aufgrund dieser Toleranzen treten in rotierenden Verdrängerpumpen für niedrigviskose Flüssigkeiten merkliche, innere Leckagen auf und sind damit weniger genau als oszillierende Verdrängerpumpen. Sie eignen sich daher hauptsächlich für viskose Fluide. Eine Auswahl an typischen, rotierenden Dosierpumpen ist unter Abbildung 10 dargestellt.

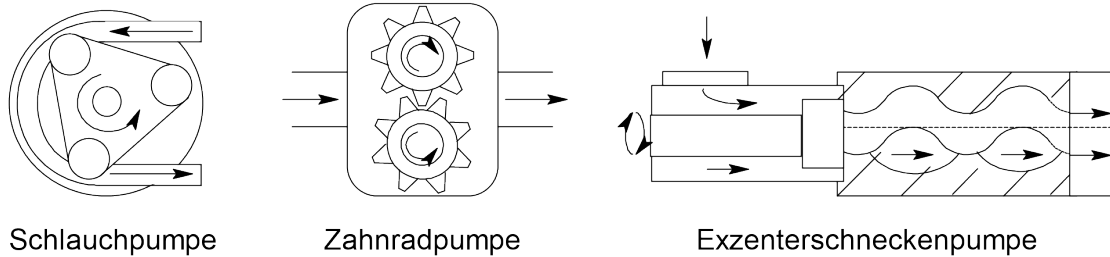


Abb. 10: Skizzen für Rotationspumpen

Hauptstellgröße dieser Pumpenart ist die Drehzahl. Ebenso wie bei der Hublänge bzw. der Hubfrequenz oszillierender Verdrängerpumpen besteht bei rotierenden Verdrängerpumpen eine direkte Proportionalität zwischen Drehzahl und Förderstrom. Eine einheitliche Charakteristik des Förderstroms lässt sich für diese Pumpen nicht definieren, da sich trotz Rotationsprinzip die Förderweisen stark unterscheiden. So weisen weißen beispielsweise Schlauchpumpen im Vergleich zu Zahnradpumpen eine viel deutlichere Pulsation des Förderstroms auf, obwohl beide Pumpe den Rotationspumpen zugeordnet werden. Demnach lässt sich auch der Dosierstrom lediglich allgemein wie in Gleichung (10) dargestellt beschreiben. Je nach Pumpentyp lässt sich dann die geometrische Volumenabgrenzung detaillierter ausführen. [Vet02]

$$\dot{m} = \rho \cdot V_u \cdot n \cdot \eta_V \quad (10)$$

\dot{m} ... Fördermassenstrom
 V_u ... Verdrängungsvolumen pro Umdrehung
 h_K ... Kolbenquerschnitt
 n ... Drehzahl
 ρ ... Dichte der Flüssigkeit
 η_V ... volumetrischer Wirkungsgrad

Um nach der Vorstellung der verschiedenen Pumpentypen eine Auswahl für die eigene Dosieraufgabe auswählen zu können, sind die verschiedene Kriterien wie Wirkungsgrad, förderbare Viskosität, Druckstabilität und weitere heranzuziehen. Ausführlich beschriebene Auswahlhilfen in Form von Tabellen und Diagrammen bieten hierbei [Vet02, S. 125, 219, 659 ff.], sowie [Bie19, S. 224 ff.].

3.2.3 Ermittlung des Dosierstroms

Je nach Anforderung an die Genauigkeit der Dosierung kommen verschiedene Messsysteme in Frage, um den Dosierstrom zu bestimmen. Hierbei wird zwischen redundanzfreien Dosiersystemen und Dosiersystemen mit Messredundanz unterschieden.

Für redundanzfreie Dosiersysteme wird hierbei auf lediglich eine Systemkomponente, beispielsweise der Kennlinie einer Dosierpumpe, vertraut um den geforderten Dosierstrom umzusetzen. Dosierte diese Systemkomponente fehlerhaft bleibt der Fehler unentdeckt. Diese Art der Dosierregelung ist für Prozesse mit geringen Anspruch an Dosiergenauigkeit möglich und deren Konsequenzen im Produktionsprozess tolerierbar sind. In Abbildung 11 ist ein Beispiel einer solch redundanzfreien Dosiersystems mit Hilfe einer Pumpenkennlinie dargestellt.

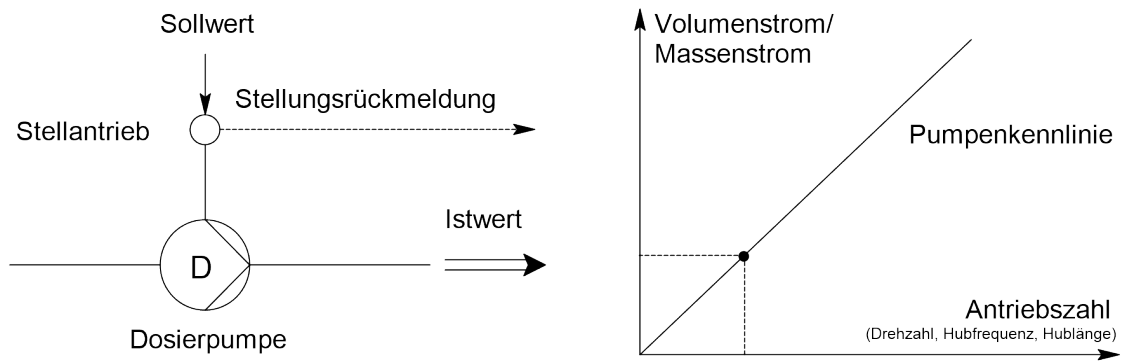


Abb. 11: Skizze für redundanzfreies Dosiersystem, erstellt nach [Vet02]

In Dosiersystemen mit Messredundanz werden solche Abweichungen durch eine weitere Systemkomponente, wie beispielsweise einem zusätzlichen Durchflussmesser, registriert. Die dadurch geschaffene Fehlervermeidung erhöht die Produktionssicherheit im Prozess, erfordert jedoch auch bereits bei Ausfall einer der Komponenten eine Fehlersuche. In Abbildung 12 ist eine Skizze für eines solch redundant ausgeführten Dosiersystems mit Dosierpumpe und Durchflussmesser dargestellt.

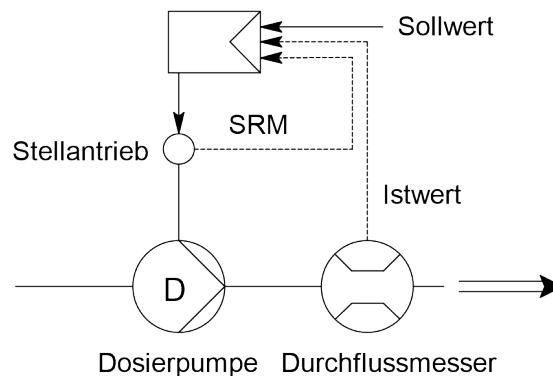


Abb. 12: Skizze für Dosiersystem mit Redundanz, erstellt nach [Vet02]

Eine Möglichkeit einer Systemkomponente für die redundante Bestimmung des Dosierstroms ist ein Coriolis-Massendurchflussmesser. Hierbei wird unter Nutzung der einer schwingenden Bewegung die auftretende Corioliskraft zur Messung des Massenstroms eines strömenden Fluides genutzt. Diese wird über induktive Messung der Phasendifferenz zwischen Rohreinlauf und Rohrauslauf bestimmt. Ein Vorteil dieser Art der Durchflussmessung ist, dass neben dem Massenstrom auch Eigenschaften wie die Viskosität, der Massenanteil und die Dichte des Fluides bestimmt werden können. Diese Messungen basieren dabei dann jedoch auf leicht anderen Messmethoden, als die der Bestimmung des Massenstroms. [Ign15]

Nachteil ist jedoch, dass für die Messung nach dem Prinzip der Corioliskraft hohe Strömungsgeschwindigkeiten notwendig sind. Ähnliches gilt übrigens auch für die Messung mittels magnetisch-induktiven Durchflussmesser bei der mindestens ca. $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Strömungsgeschwindigkeit notwendig sind. Das kann zum Problem werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund von Druckverlusten nicht weiter erhöht werden kann. Das Messverfahren der Ultraschall-Durchflussmessung wäre zu den bereits genannten Verfahren eine Alternative, jedoch können durch zu hohe

Viskosität des Fluides die erzeugten mechanischen Wellen zu sehr gedämpft werden und es erfolgt keine sinnvolle Messung. [D. nt, Wik21, Wik20]

Neben auf verschiedenen physikalischen Effekten beruhenden Durchflussmessern gibt es auch so genannte Mengenmesser. Diese beruhen meist auf einem Verdrängerprinzip und fungieren als Volumen- oder Geschwindigkeitszähler. Typische Beispiele hierfür sind Ovalradzähler und Turbinenzähler. Volumenzähler bestimmen die durchgeflossene Menge an Fluid durch meist rotierende Verdrängerkörper wie Zahnräder oder Drehkolben. Durch den Fluss des Fluides drehen sich die Verdrängerkörper und es lassen sich pro Umdrehung die transportierten Volumina des Fluides bestimmen. Vorteil dieser Zähler ist, dass sie meist sehr genau arbeiten und deshalb im Alltag oft als Zähler für Wasser, Benzin oder Diesel eingesetzt werden. [Ign15] Ihr Nachteil besteht hauptsächlich im mechanischen Wirkprinzip. Dieses hat zur Folge, dass durch zu drehenden Verdrängerkörper für höhere Viskositäten von Fluiden zusätzliche Druckverluste entstehen. Zudem obliegen die Verdrängerkörper je nach Medium auch einem gewissen Verschleiß durch die mechanische Bewegung oder dem Fluid selbst. Zur Bestimmung des Durchflusses ist das gezählte Fördervolumen durch die Förderzeit zu berechnen.

Neben der Messung mittels Durchflussmesser besteht zusätzlich auch die Möglichkeit den Dosierstrom über ein Loss-in-Weight Verfahren zu bestimmen. Mit diesem hauptsächlich für schlecht fließende, inhomogene Schüttgüter genutztem Verfahren wird der Massenstrom mittels Differentialdosierer bestimmt. Dieser Differentialdosierer misst den Dosierstrom im klassischen Sinne mit Hilfe einer Waage die Gewichtsabnahme über die Zeit. Alternativ ist bei fester, bekannter Geometrie des Dosierbehälters und ausreichender Genauigkeit das selbe Prinzip für eine Füllstands- bzw. Volumenabnahme mit Hilfe eines Radarfüllstandsensors möglich. Vorteil der Förderstrombestimmung über ein solches Loss-in-Weight oder Loss-in-Volume Verfahren liegt darin, dass diese nicht vom Fließverhalten des Mediums beeinflusst werden. Jedoch ist zu bedenken, dass eine ausreichende Auflösung der Messbereiche für die jeweilige Dosierung, sowie der richtige Aufbau für das Messprinzip garantiert werden muss. So ist beispielsweise für die Massenmessung die Entkopplung des Wägesystems und für die Radarfüllstandsmessung die einwandfreie Reflexion der Mikrowellensignale an der Dosiergutoberfläche zu gewährleisten. Zudem ist die Dosiergenauigkeit der Radarfüllstandsmessung stark von der Höhe des Dosierbehälters abhängig. Selbst bei ± 2 mm Messabweichung können diese je nach Behälter bereits mehrere Gramm bis Kilogramm Abweichung bedeuten.[Vet02, VEG22]

3.3 Stand der Technik zur Dosierung hochviskoser Verdickungsmittel

Optional betrachten –i Fassfolgeplatten Systeme

3.4 Chemische Produktion und Prozesssicherheit

einleitender Text

3.4.1 Produktionsweisen in der Chemie

Beschreibung der Produktionsweisen in Chemie –i Kampagne

3.4.2 Industrielle Gebinde für Flüssigkeiten

Um ein Edukt neu in die Produktion einzubinden sind, nicht nur die chemisch-physikalischen Eigenschaften relevant. Auch der Aspekt der Gebindeform ist maßgeblich für die Einfügung des Eduktes in den Produktionsablauf. Für flüssige Edukte sind im Tagesgeschäft der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH hauptsächlich Kunststoff-IBCs (Intermediate Bulk Container) und zum Teil Kunststoff-Deckelfässer im Einsatz. Es sei jedoch erwähnt, dass auch weitere Gebinde auf dem Verpackungsmarkt verfügbar sind, wie beispielsweise Flüssig-IBCs, Kanister, Hobbocks oder Metallfässer.

Den IBC als kubisches Gebinde gibt ca. seit den 1960er Jahren und hat sich über eine Richtlinie des VDI aus den frühen 70er-Jahren zu einem Standard der großen Einzelverpackungen entwickelt. Zuvor waren zum Großteil 200 L-Fässer im Einsatz, welche sich neben der geometrischen Form auch maßgeblich im Handling zum IBC unterscheiden. [neu22] So lassen sich Fässer in dieser Größenordnung beispielsweise vorwiegend als 4er-Packung sicher transportieren und benötigen hierfür zusätzliche Paletten, sowie Schrumpffolie oder Transportbänder um die Behälter zu fixieren. Ein IBC hingegen kann direkt als Gebinde mit einem Hubwagen oder Gabelstapler transportiert werden ohne umfangreiche Vorbereitung. Weitere Punkte im Vergleich zwischen IBC und Fass finden sich unter Tabelle 2.

Tab. 2: Allgemeiner Vergleich der Gebinde IBC und Fass [Kam22]

	Einzelfass (1 Fass)	Fasspalette (4 bis 5 Fässer)	IBC (1 Container)
UN-Zertifizierung	möglich		
Transportvorbereitung	evtl. extra Palette mit Schrumpffolie/Transportbänder		keine
Transport (voll)	schwer mit Fassheber	Gabelstapler, Flurförderzeuge	
Transport (teilentleert)	schwer mit Fassheber	schwer mit Gabelstapler, Flurförderzeuge	Gabelstapler, Flurförderzeuge
Abfüllmenge	klein	klein bis mittel	mittel bis groß
Lagerkapazität	sehr klein	klein bis mittel	groß
Erwärmbarkeit	möglich	nicht möglich	möglich, aber nicht effektiv
Verwendung	i.d.R. einmalig		mehrmals möglich
Stapelbarkeit	schlecht stapelbar		gut stapelbar
Produktreste	> 5 kg		≤ 5 kg
Anschlüsse	Deckel oder Spundloch		Deckel oder Auslaufarmatur

3.4.3 Sicherheit von Chemieanlagen

Beschreibung Sicherheit in Chemieanlagen mit Explosionszone etc.

3.5 Allgemein heuristische Entscheidungsverfahren

Allgemein beschreiben mit verschiedenen Möglichkeiten

3.6 Technische Planung

3.6.1 R&I- Fließbild

Erklären was und wofür es das gibt

3.6.2 Rohrleitungsplanung

Rohrklassifizierung und Werkstoff Auswahl ??

3.6.3 Signalverarbeitungsplanung

Keine Ahnung selber was ausdenken ?

4 Material und Methoden

4.1 Ist-Analyse

4.1.1 Aktuelles Dosierverfahren

4.1.2 Produktionsweise

4.2 Rechnerische Auslegung

4.2.1 Berechnung des Druckverlustes für verschiedene Leitungsdurchmesser

4.2.2 Rohrleitungsklassifizierung nach PAS 1057

4.3 Fachgespräche und Angebotsanfragen

4.4 Experimentelle Untersuchungen

4.4.1 Ermittlung der Viskosität nach DIN EN ISO 2555

Eine Möglichkeit die dynamische Viskosität einer Dispersion zu bestimmen, ist die Messung mit einem Rotationsviskosimeter nach DIN EN ISO 2555. Da in dieser Norm hauptsächlich ein Rotationsviskosimeter mit Einzelzylinder beschrieben ist, wird an dieser Stelle auf die DIN ISO 3219 verwiesen. In dieser Norm werden zusätzlich Rotationsviskosimeter mit koaxialem Zylinder und Kegel-Platte-Viskosimeter näher beschrieben. [DIN13, DIN18]

Das bei ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH verwendete Verfahren zur Viskositätsbestimmung ist angelehnt an die DIN EN ISO 2555 unter Nutzung eines digitalen BROOKFIELD-Rotationsviskosimeters, benannt nach dem Hersteller AMETEK® BROOKFIELD. Diese Viskosimeter haben den Vorteil preisgünstig zu sein und erlauben ein Messen der Viskosität direkt im Probengefäß. Da jedoch durch das direkte Eintauchen in ein theoretisch beliebiges Probengefäß nur eingeschränkte Übertragbarkeiten und Reproduzierbarkeiten möglich sind, können

diese Geräte hauptsächlich für Vergleichsmessungen genutzt werden. Der Hersteller gibt hierfür an ein 600 mL Becherglas als Probengefäß zu nutzen, jedoch wird in der DIN EN ISO 2555 darauf hingewiesen, dass die Becherglasgröße freigewählt werden darf. Für den Vergleich von Messungen rät die Norm dennoch jeweils die gleiche Größe des Becherglases zu nutzen. [RRM08, bro, DIN18]

Die Messung mittels digitalem BROOKFIELD-Viskosimeter ist vergleichsweise einfach. Benötigt werden hierfür das Viskosimeter in einer Halterung, ein Becherglas, ein Temperaturmessgerät und eine herstellerspezifische Spindel. Soll die Viskosität bei bestimmten Temperaturen, abweichend der Labortemperatur bestimmt werden, ist zusätzlich ein thermostatisches Flüssigkeitsbad nötig (vgl. Abb. 13).

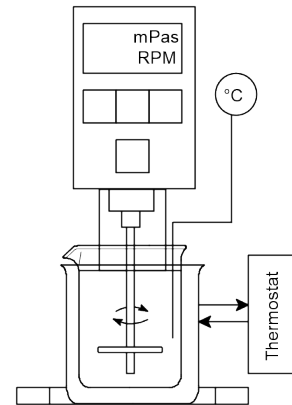


Abb. 13: Viskositätsmessung
mit digitalem
BROOKFIELD-
Rotationsviskosimeter

Die Messung lässt sich nach dem Aufbau über das Bedienfeld starten in dem Spindel und Drehzahl eingegeben werden. Sobald die Messung startet beginnt sich die Spindel zu drehen.

Das Messprinzip eines solchen BROOKFIELD-Viskosimeters basiert auf der Messung der Winkelabweichung, auch Torsion genannt, zwischen der im Viskosimeter verbauten Welle und einer zweiten darunter angeordneten Spindel-Welle mit fest definierten geometrischen Körper. Beide Wellen drehen sich dabei mit der selben Drehzahl und sind über eine Federeinheit verbunden. Bei Digital-Viskosimetern wird der Messwert der sich dann durch die Winkelabweichung ergibt direkt über ein Display angezeigt.

Entscheidend für die Messung der Viskosität ist bei dieser Messmethode die Auswahl des bereits erwähnten Becherglases, sowie der Spindel und der Drehzahl. Spindel und Drehzahl werden dabei unter Einbezug des Viskositätsbereiches der Probe nach der gewünschten Präzision und dem Geschwindigkeitsgefälle ausgewählt. [DIN18] Durch Tabellen des Herstellers, welche sowohl Spindel als auch Viskositätsbereich in Abhängigkeit von Drehzahl und Gerätekonstanten berechnen lassen, werden diese Entscheidungen vereinfacht. [bro]

4.4.2 Erwärmungsverhalten

4.4.3 Verdünnungsverhalten

4.4.4 Pumpversuche

4.5 Nutzwertanalyse

4.5.1 Erarbeitung von Lösungsvarianten

4.5.2 Festlegen und gewichten von Entscheidungskriterien

4.5.3 Bewertung der Lösungsvarianten

4.5.4 Gesamtbeurteilung der Varianten

4.6 Computerunterstütztes Zeichnen von Plänen

4.6.1 Software: AutoCAD

4.7 Gefährdungsbeurteilung (HAZOP-Verfahren)

5 Ergebnisse

Verdickerviskosität

Berechnungen Druckverlust

Erwärmungsverhalten

Verdünnungsverhalten

Entscheidung für Pumpentyp und Leitungsdurchmesser mit Druckverlustrechnung

Zeichnungen der Dosiervarianten

Zeichnungen im R&I von der Umsetzung

5.1 Ist-Zustand der Verdickungsmitteldosierung

–¿ Sammeln von Informationen im Werk
Kampagne Mitarbeiterkosten sparen Zeitersparnis Einfachheit Ex-Schutz PLS
Prozesssicherheit

5.1.1 Aktuelles Dosierverfahren

5.1.2 Produktionsweise

5.2 Eigenschaften des Verdickungsmittels

5.2.1 Viskositätsmessungen

–¿ nach DIN

5.2.2 Verdünnungsverhalten

–¿ Eigenregie

5.2.3 Erwärmungsverhalten

–¿ beim Hersteller angefragt

In der geplanten Dosierung soll auf das Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 der MÜNZING CHEMIE GMBH zurückgegriffen werden. Laut Hersteller handelt es sich hierbei um einen assoziativen Polyurethan-Verdicker, welcher durch Gerüstbildung zwischen Verdickermolekülen, Bindemittel und Pigmentpartikeln die gewünschte Viskosität hervorruft und stabilisiert. Diese Beschreibung deckt sich mit den vorangegangenen Beschreibung der Assoziativverdicker.[Mun14]

5.3 Entscheidung für Gebindetyp

Preis nachfrage

5.3.1 Angebotsanfrage

5.3.2 Entscheidungsverfahren

5.4 Entscheidung für Pumpentyps und Leitungsdurchmessers

5.4.1 Berechnung des Druckverlustes

5.4.2 Literaturarbeit

Bücher gelesen für Auswahlhilfe

5.4.3 Fachgespräche und Angebotsanfrage

5.4.4 Pumpversuche

5.4.5 Entscheidungsverfahren

5.5 Entscheidung für Messverfahren

5.5.1 Literaturarbeit

Bücher gelesen für Auswahlhilfe

5.5.2 Fachgespräche und Angebotsanfrage

5.5.3 Entscheidungsverfahren

5.6 Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung

5.6.1 R&I- Fließbild der Verdickerdosierung

5.6.2 Theoretische Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung

5.6.3 Signalverarbeitungsplanung der Verdickerdosierung

5.7 Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickmitteldosierung

6 Diskussion


7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Literatur

- [Bie19] BIERWERTH, Walter: *Tabellenbuch Chemietechnik: Daten, Formeln, Normen, Vergleichende Betrachtungen aus den Bereichen: allgemeine und technische Mathematik, Physik, Chemie, Verfahrenstechnik, Werkstoffkunde, Prozessleittechnik/MSR-Technik, Arbeitssicherheit*. 11. erweiterte Auflage. Haan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG, 2019 (Europa-Fachbuchreihe für Chemieberufe). – ISBN 9783808525166
- [bro] BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, INC. (Hrsg.): *BROOKFIELD DV-I PRIME Operating Instructions BROOKFIELD DV-I PRIME Digital Viscometer*. <https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametektbrookfield/manuals/obsolete%20manuals/dv-i%20prime%20m07-022-d0613.pdf?la=en>, Abruf: 31.01.2022
- [BRRS09] BROCK, Thomas ; RÖMPP-REDAKTION ; SEIBEL, Jürgen: *Verdickungsmittel*. Thieme Gruppe, 2009 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-22-00381>
- [Bsc18] BSCHORER, Sabine: *Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch*. 11., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden and Heidelberg : Springer Vieweg, 2018 (Lehrbuch). – ISBN 978-3-658-20037-4
- [D. nt] D. STEPANEK ; SCHWING VERFAHRENSTECHNIK (Hrsg.): *Was den Betreiber von Massedurchflussmessern nach dem CORIOLIS-Prinzip interessiert*. <http://www.inelektro.de/P051a.pdf>. Version: Unbekannt, Abruf: 06.02.2022
- [DIN13] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Kautschuk-Latex – Bestimmung der Viskosität nach dem Brookfield-Verfahren (DIN ISO 1652:2011)*. Berlin, Februar 2013
- [DIN18] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Kunststoffe – Harze im flüssigen Zustand, als Emulsionen oder Dispersionen – Bestimmung der scheinbaren Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter mit Einzelzylinder (DIN EN ISO 2555:2018)*. Berlin, September 2018
- [Fot05] FOTH, Hans-Jochen: *Hagen-Poiseuillesches Gesetz*. Thieme Gruppe, 2005 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-08-00189>
- [Fot14] FOTH, Hans-Jochen: *Reynolds-Zahl*. Thieme Gruppe, 2014 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-01140>
- [Hol10] HOLZE, Rudolf: *Nichtnewtonsche Flüssigkeiten*. Thieme Gruppe, 2010 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-14-01075>
- [Ign15] IGNATOWITZ, Eckhard: *Chemietechnik*. 12. Aufl., 1. Dr. Haan-Gruiten : Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 2015. – ISBN 9783808571200
- [Kam22] KAMROTH, Markus ; ROMAN-LUCA ZANK (Hrsg.): *Vergleich von IBCs und Fässern: Gespräch*. 01.02.2022

- [Mez16] MEZGER, Thomas (Hrsg.): *Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Hannover : Vincentz Network, 2016. <http://dx.doi.org/10.1515/9783748600121>. <http://dx.doi.org/10.1515/9783748600121>. – ISBN 9783748600121
- [Msi17] MSIMCA: *Reynoldszahl-Diagramm für gerade Rohrleitungen nach Prandtl-Colebrook*. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/R.Rohrreibungsbeiwert.jpg>. Version: 14.05.2017, Abruf: 27.01.2022. – (bearbeitet), CC-BY-SA-4.0
- [Mun14] MÜNZING CHEMIE GMBH (Hrsg.): *Technisches Datenblatt - TAFIGEL PUR 85*. https://www.munzing.com/static/06f130839b44f324b19e0c2d6e8ace93/td_TAFIGEL_PUR_85_DE_f12e7b1de6.pdf. Version: März 2014, Abruf: 28.01.2022
- [Mun18] MÜNZING CHEMIE GMBH (Hrsg.): *TAFIGEL® RHEOLOGIEMODIFIZIERER: Technische Nachrichten Nr. 04*. <https://docplayer.org/storage/69/60353187/1643642820/Qj1vDFp1hoXznndlj8RBog/60353187.pdf>. Version: 2018, Abruf: 31.01.2022
- [neu22] NEUE VERPACKUNG: *Die Entwicklung des Edelstahl-IBC und seine Einsatzgebiete*. <https://www.neue-verpackung.de/markt/die-entwicklung-des-edelstahl-ibc-und-seine-einsatzgebiete-11.html>. Version: 01.02.2022, Abruf: 01.02.2022
- [RRM08] RÖMPP-REDAKTION ; MILLOW, Sieghard: *Viskosimeter*. Thieme Gruppe, 2008 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-22-00922>
- [VEG22] VEGA GRIESHABER KG: *VEGAPULS 21*. <https://www.vega.com/de-de/produkte/produktkatalog/fuellstand/radar/vegapuls-21>. Version: 07.02.2022, Abruf: 07.02.2022
- [Vet02] VETTER, Gerhard (Hrsg.): *Handbuch Dosieren*. 2. Aufl. Essen : Vulkan-Verl., 2002. – ISBN 3802721993
- [Wik20] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Ultraschall-Durchflussmesser*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultraschall-Durchflussmesser&oldid=206388262>. Version: 2020, Abruf: 07.02.2022. – Creative Commons Attribution-ShareAlike License Page Version ID: 206388262
- [Wik21] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Magnetisch-induktiver Durchflussmesser*. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetisch-induktiver_Durchflussmesser&oldid=218181851. Version: 2021, Abruf: 07.02.2022. – Creative Commons Attribution-ShareAlike License Page Version ID: 218181851

Abbildungsverzeichnis

1	Einteilung von Verdickungsmitteln nach Zusammensetzung [BRRS09]	8
2	Einteilung von Assoziativ-Verdickern nach chemischer Struktur [BRRS09]	8
3	schematische Struktur eines assoziativen Polyurethan-Verdickers, erstellt nach [BRRS09]	9
4	Netzstruktur durch Verdickermittel in Latex-Dispersion (mit und ohne Tensid), erstellt nach [Mez16]	9
5	Fließkurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Hol10]	10
6	Viskositätskurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Mun18]	10
7	NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramm [Msi17, ]	12
8	Skizze einer Kolbenpumpe	14
9	Skizze einer Membranpumpe	14
10	Skizzen für Rotationspumpen	15
11	Skizze für redundanzfreies Dosiersystem, erstellt nach [Vet02]	16
12	Skizze für Dosiersystem mit Redundanz, erstellt nach [Vet02]	16
13	Viskositätsmessung mit digitalem BROOKFIELD-Rotationsviskosimeter	20

Tabellenverzeichnis

1	Strömungsformen und ihre Reynoldszahlen [Fot14]	11
2	Allgemeiner Vergleich der Gebinde IBC und Fass [Kam22]	18

Anhang

Abkürzungsverzeichnis