



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

Merseburg, 16.02.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Zielsetzung und Abgrenzung der Aufgabenstellung	6
2.1	Zielsetzung der Aufgabenstellung	6
2.2	Abgrenzung der Aufgabenstellung	6
3	Theoretische Grundlagen	8
3.1	Chemische Produktion und Prozesssicherheit	8
3.1.1	Produktionsweisen in der Chemie	8
3.1.2	Industrielle Gebinde für Flüssigkeiten	8
3.1.3	Sicherheit von Chemieanlagen	9
3.2	Verdickungsmittel	11
3.3	Dosierung von Flüssigkeiten	13
3.3.1	Charakterisierung des Dosierstroms	13
3.3.2	Dosierpumpen	18
3.3.3	Ermittlung des Dosierstroms	20
3.4	Zeichnerische Umsetzung und Rohrleitungsplanung	22
3.4.1	Rohrleitungsplanung	23
3.4.2	Darstellung der Chemieanlage	25
3.4.3	EMSR-Stellenplan	26
3.5	Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren	27
4	Material und Methoden	29
4.1	Entscheidungsverfahren nach GRÜNING und KÜHN	29
4.1.1	Nutzenwertmaxime	31
4.2	Experimentelle Untersuchungen	31
4.2.1	Untersuchung der Temperaturabhängigkeit:	32
4.2.2	Untersuchung der Verdünnungsabhängigkeit:	32
4.2.3	Pumpversuche	35
4.3	Rechercharbeit: Literaturarbeit, Fachgespräche und Angebotsanfragen	35
4.4	Gefährdungsbeurteilung (HAZOP-Verfahren)	35
4.5	Computerunterstütztes Zeichnen mit AutoCAD und QElectroTech . . .	35
5	Ergebnisse	36
5.1	Verifizierung und Analyse des Dosierproblems	36
5.1.1	Ist-Zustand: Aktuelles Dosierverfahren und Produktionsweise .	36
5.1.2	Soll-Zustand: Anforderung an die Dosierung	36
5.1.3	Eigenschaften des Verdickungsmittels	36
5.1.4	Viskositätsmessungen	36
5.1.5	Verdünnungsverhalten	36
5.1.6	Erwärmungsverhalten	36
5.1.7	Pumpversuche	36
5.2	Problem: Entscheidung für ein Verfahren	37
5.3	Problem: Entscheidung für Gebindetyp	37
5.4	Problem: Direkte Zugabe mit Pumpe oder Dosierbehälter	37
5.5	Problem: Auswahl des Pumpentyps	37
5.6	Problem: Messverfahren	37

5.7	Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung	37
5.7.1	Verfahrensfließbild der Verdickerdosierung	37
5.7.2	R&I- Fließbild der Verdickerdosierung	37
5.7.3	Theoretische Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung . . .	37
5.7.4	Signalverarbeitungsplanung der Verdickerdosierung	37
5.8	Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickungsmitteldosierung . .	37
6	Diskussion	37
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	37
	Literaturverzeichnis	40
	Abbildungsverzeichnis	41
	Tabellenverzeichnis	41
 Noch zu Erledigen		
	Aufgabenstellung ist auf ein Drittel der Seite zu kürzen	6
	Optional Stand der Technik betrachten –j Fassfolgeplatten Systeme	8
	Münch nachfragen ob diese Riskotabelle nur für HAZOP galt	30
	Vielleicht noch Nutzenwerttabelle zur Veranschaulichung ergänzen ?	31
	Vielleicht eher später schreiben ?	35
	Entscheidungsprobleme werden aufgrund des Umfangs und der schweren Nachvollziehbarkeit nicht dargestellt	36

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 16.02.2022

Unterschrift:_____

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne vertrauliche Informationen der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten 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 16.02.2022

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.

Aufgabenstellung ist auf ein Drittel der Seite zu kürzen

3 Theoretische Grundlagen

Optional Stand der Technik betrachten –j. Fassfolgeplatten Systeme

3.1 Chemische Produktion und Prozesssicherheit

Es gibt verschiedene Charakteristika, die den Betrieb einer chemischen Anlage beschreiben. Dazu gehören zum einen die technische Ausführung der Verfahrenstechnik, aber auch Aspekte wie die Arbeitsweise der Produktion oder das vorliegende Sicherheitskonzept.

3.1.1 Produktionsweisen in der Chemie

Chemieanlagen können je nach Produkt und Produktionsmenge auf verschiedene Weisen produzieren.

Batch-Betrieb Eine Arbeitsweise der chemischen Produktion stellt der sogenannte Batch-Betrieb, auch Chargenbetrieb genannt, dar. Bei dieser Fahrweise werden jegliche Prozess- und Verfahrensschritte in zeitlich festgelegter Reihenfolge nacheinander durchgeführt. Die Ausgangsstoffe werden hierfür in ein geeignetes Reaktionsgefäß, wie zum Beispiel einen Rührkessel, gegeben und die Reaktion gestartet. Danach wird das Reaktionsprodukt in entsprechende Lagertanks oder Gebinde transferiert und das Reaktionsgefäß gereinigt. Gerade für geringe Produktionsmengen oder häufigerem Wechsel der Produkte wird diese Betriebsweise bevorzugt. Durch den variablen Aufbau der Anlage werden somit auch verschiedene Reaktionszeiten und Herstellungsverfahren möglich gemacht. [Ign15]

In der Produktionsplanung einer solchen Produktionsweise können mehrerer Batches auf einer Fertigungslinie für das selbe Produkt geplant werden. Die Zusammenfassung dieser Batches wird allgemein als Produktionskampagne bezeichnet und hat den Vorteil, dass mehrere Batches hintereinander gefahren werden und somit weniger Unterbrechungen durch mögliche Umrüst- oder Reinigungsarbeiten entstehen. Zudem lassen sich bei der Lagerung einer Kampagne durch die einzelnen Batches Produktionsabweichungen ausgleichen. [SAP22]

Kontinuierlicher Betrieb Dem Batch-Betrieb gegenüber steht der kontinuierliche Betrieb. Im Gegensatz zur zeitlichen Taktung von Batch-Anlagen findet für diese Arbeitsweise eine örtliche Separierung der Verfahrensschritte bei kontinuierlichem Massenstrom statt. Die Prozessbedingungen, wie Temperatur, Druck oder Produktzusammensetzung sind deshalb stationär. Durch den festen Reaktionsablauf der Anlage eignet sich diese Fahrweise hauptsächlich für große Produktionsmengen. Neben dem Hauptprodukt fallen für diese Produktionsweise natürlich auch mögliche Nebenprodukte kontinuierlich an und sind entsprechend zu verwerten. [Ign15]

3.1.2 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. [Hü22] 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 1.

Tab. 1: Allgemeiner Vergleich der Gebinde IBC und Fass [Kam22]

	Einzelfass (1 Fass)	Fasspalette (4 bis 5 Fässer)	IBC (1 Container)
UN-Zertifikat	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

3.1.3 Sicherheit von Chemieanlagen

Das Thema Sicherheit findet sich neben dem Gefahrguttransport in der Logistik natürlich auch im restlichen Umfang der Chemieanlage wieder. Vom Betreiber einer solchen Anlage ist durch verschiedene Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln ein Gesamtsicherheitskonzept zu erarbeiten und umzusetzen. Beispiele solcher Gesetze sind das Arbeitsschutzgesetz, das Chemikaliengesetz, das Umweltverträglichkeitsgesetz und das Geräte- und Produktionssicherheitsgesetz GSPG. Diese Gesetze münden dann seit dem Jahr 2002 in die Betriebssicherheits-

verordnung (kurz: BetrSichV), welche eine Gesamtbetriebssicherheitsverordnung darstellt und die eben genannten Gesetzte zusammenfasst. Weitere zu beachtende Verordnungen sind die Explosionsschutz- und die Gefahrstoffverordnung. Aus diesen Verordnungen setzten sich nun wiederum verschiedenste technische Regeln wie die EU-Richtlinie 94/9/EG (ATEX 100a), Technische Regeln für Behälter (TRB) oder Technische Regeln für Rohrleitungsanlagen (TRR) zusammen. Diese erleichtern das Umsetzen, der geforderten Verordnungen und Gesetze und bilden zusammen mit berufsgenossenschaftlichen Regelungen ein Gesamt-Sicherheitskonzept für eine chemische Anlage. [Ign15]

Ausführung eines solchen Sicherheitskonzeptes in der Praxis zeigt sich zum Beispiel in Form von Arbeits- und Betriebsanweisungen für die Mitarbeiter. Aber auch regelmäßige Sicherheitsschulungen, Instandhaltung der Anlage, Nutzung sicherheitstechnischer Ausrüstung, Dimensionierung und Ausführung der Verfahrenstechnik, Ausweisung von Explosionszonen und viele weitere Punkte ergeben sich aus diesem festgelegten Sicherheitskonzept. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf die angegebenen Verordnungen verwiesen. Für einen Überblick über die Thematik lassen sich weitere Informationen in [Ign15] finden.

Zoneneinteilung explosionsgefährdeter Bereiche gemäß EU-Richtlinie 1999/92/EG

Da das Sicherheitskonzept der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH ebenfalls die Einteilung von Explosionszonen beinhaltet, wird die EU-Richtlinie 1999/92/EG (ATEX 137) in kurzer Form näher erläutert. Die Prüfung eines Bereiches auf eine explosionsgefährdete Zone erfolgt durch eine sicherheitstechnische Fachkraft in einem Explosionsschutzdokument. Wird der Bereich als explosionsgefährdet eingestuft, ist für Atmosphären aus brennbaren Gasen, Nebeln oder Dämpfen und Luft eine Festlegung auf die Zone 0, Zone 1 oder Zone 2 möglich. Diese unterscheiden sich nach Ausmaß der Explosionsgefährdung in diesem Bereich. Analog dazu teilen sich die Zonen 20, 21 und 22 in explosionsgefährdeter Bereich für Staubwolken ein. In der EU-Richtlinie 1999/92/EG stellt Zone 2 der explosionsgefährdeten Bereiche den Bereich mit der geringsten Explosionsgefahr da. Im Normalbetrieb ist nicht davon auszugehen, dass eine explosionsfähige Atmosphäre entsteht und wenn dann nur kurzzeitig in Erscheinung tritt. Beispiele hierfür können Produktionsbereiche sein in denen mit brennbaren Flüssigkeiten hantiert wird. Zudem gehören Bereiche, welche die Zonen 1 und 0 näher umgeben ebenfalls zur Zone 2. Die Zone 1 beschreibt den nächsthöheren Grad der explosionsgefährdeten Bereiche. In dieser Zone treten im Normalbetrieb gelegentlich explosionsfähige Atmosphären als Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln und Luft auf. Zu dieser Zone gehören jegliche Bereiche in näherer Umgebung zu Zone 0, aber auch zum Teil das innere von Reaktionsgefäßen, der nähere Bereich von leicht zerbrechlichen Armaturen (z.B. aus Glas) oder der Raum um Beschickungsöffnungen und Abfüllanlagen. Bereiche mit der größten Explosionsgefährdung werden mit Zone 0 gekennzeichnet. Hier sind explosionsfähige Atmosphären aus Luft und brennbaren Stoffen (Gase, Nebel, Dämpfe) häufig oder über längere Zeiträume vorzufinden. Meist werden die Bedingungen für diese Zone nur im Inneren von Behältern, Rohrleitungen oder Anlagen bedient. [Ign15, BB18]

Verwendung von Betriebsmitteln in Ex-Zonen gemäß EU-Richtlinie 2014/34/EU

Möchte man nun ein neues Betriebsmittel, wie beispielsweise eine Pumpe, in der Anlage einführen ist hier ebenfalls der Explosionsschutz zu beachten.

Hierfür gibt die EU-Richtlinie 2014/34/EU eine umfangreiche Möglichkeit der Einstufung und Kennzeichnung vor. Neben einer Prüfung der Zündtemperatur für den verwendeten Prozessstoff sind für elektrische Betriebsmittel die Oberflächentemperaturen entscheidend für die Wahl der Temperaturklasse in Tabelle 2. Die Zündtemperatur des Prozessstoffes sollte dabei mindestens 40 °C über der zulässigen Oberflächentemperatur des Betriebsmittels sein. Die Angabe der Explosionszone und der Temperaturklasse sind als Minimum der zu tätigenen Einstufungen zu verstehen, um ein Betriebsmittel für einen explosionsgefährdeten Bereich auszulegen. Es sind jedoch auch weitere Aspekte und Einstufungen in der Richtlinie beschrieben, wie der Einsatzbereich, die Explosionsgruppe oder das Geräteschutzniveau, welche ebenfalls hinzugezogen werden sollten. Mehr dazu in einem sehr anschaulichen Plakat unter [ECO16] oder in [bgc22].

Tab. 2: Temperaturklassen laut EU-Richtlinie 2014/34/EU, erstellt nach [Ign15]

Temperatur- klasse	Betriebsmittel Oberflächentemperatur	Prozessstoff Zündtemperatur
T 1	450 °C	$\geq 450\text{ °C} \rightarrow 490\text{ °C}$
T 2	300 °C	$\geq 300\text{ °C} \rightarrow 340\text{ °C}$
T 3	200 °C	$\geq 200\text{ °C} \rightarrow 240\text{ °C}$
T 4	135 °C	$\geq 135\text{ °C} \rightarrow 175\text{ °C}$
T 5	100 °C	$\geq 100\text{ °C} \rightarrow 140\text{ °C}$
T 6	85 °C	$\geq 85\text{ °C} \rightarrow 125\text{ °C}$

Aufgrund der hohen Explosionsgefährdung sind deshalb in den Zonen 0 und 1 nur Geräte erlaubt, die explosionsicher sind. Ist ein Gerät mit dem Symbol Ⓢ gekennzeichnet, darf es in einen der entsprechenden Zonen verwendet werden, da durch die nach Prüfung vergebene Kennzeichnung eine Explosion in einer explosionsfähigen Atmosphäre ausschließt. Technisch wird dies zum Beispiel durch eine druckfeste Kapselung oder Eigensicherheit gewährleistet. In Zone 2 ist die Regelung hierfür nicht so streng. Hier reicht es wenn das Gerät schwadensicher ist und es beim kurzfristigen auftreten einer explosionsfähigen Atmosphäre über mindestens 2 h nicht zu Explosion kommt. [Ign15]

3.2 Verdickungsmittel

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 Auftrags-, 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]

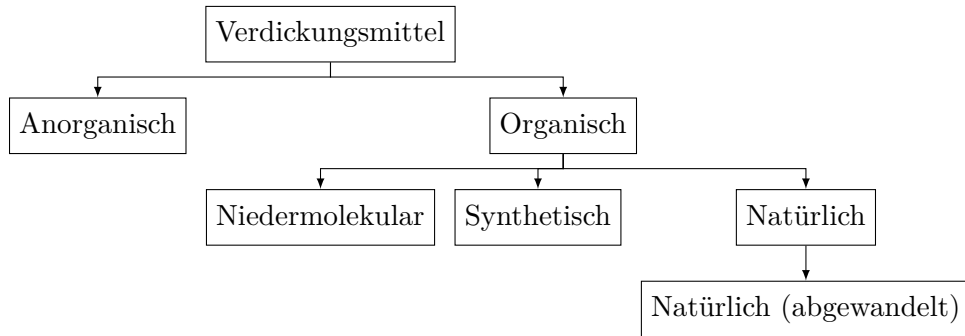


Abb. 1: Einteilung von Verdickungsmitteln nach Zusammensetzung [BRRS09]

Je nach Verdickungsmittel können verschiedene Effekte wie Gelbildung, Solvatation, 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).

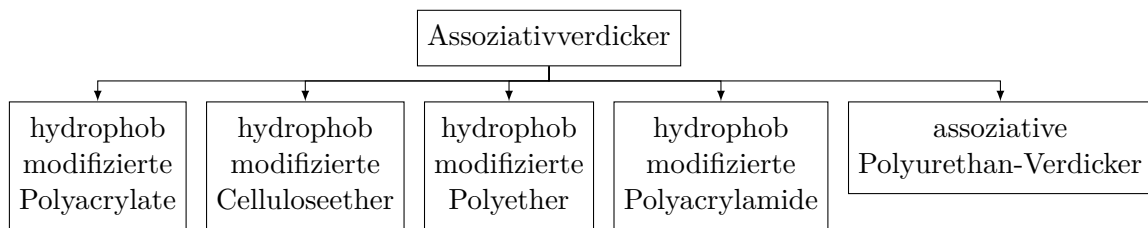


Abb. 2: Einteilung von Assoziativ-Verdickern nach chemischer Struktur [BRRS09]

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]

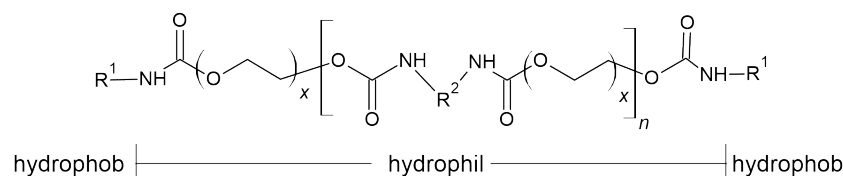


Abb. 3: schematische Struktur eines assoziativen Polyurethan-Verdickers, erstellt nach [BRRS09]

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]

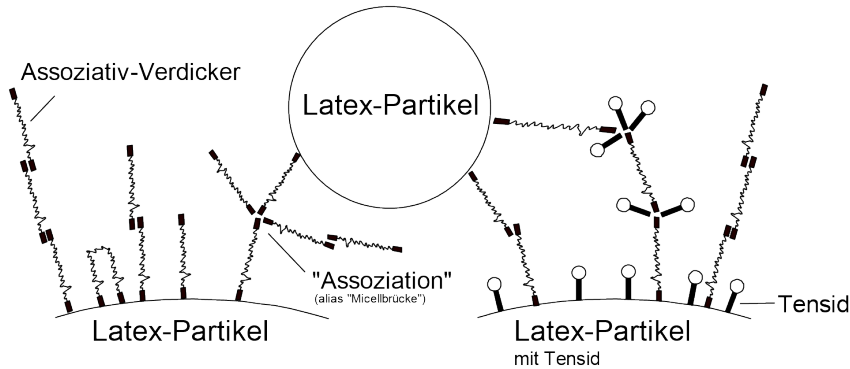


Abb. 4: Netzstruktur durch Verdickermittel in Latex-Dispersion (mit und ohne Tensid), erstellt nach [Mez16]

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.

3.3 Dosierung von Flüssigkeiten

3.3.1 Charakterisierung des Dosierstroms

Rheologie von Fluiden 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.

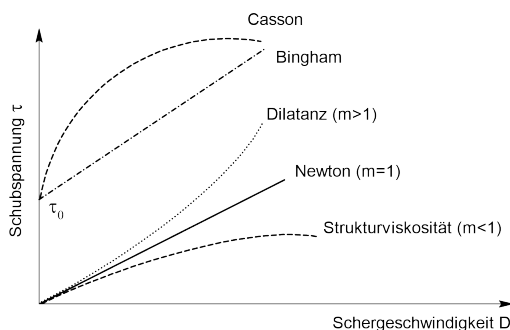


Abb. 5: Fließkurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Hol10]

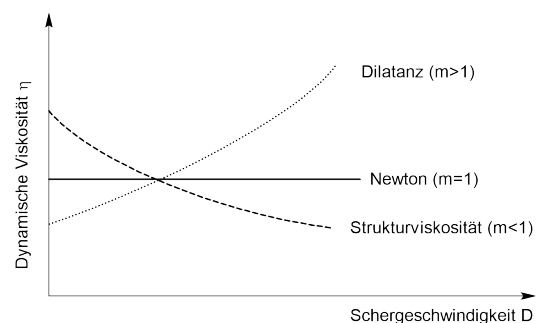


Abb. 6: Viskositätskurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Mun18]

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]

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]

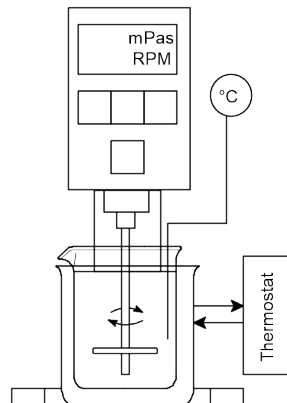


Abb. 7: Viskositätsmessung mit digitalem BROOKFIELD-Rotationsviskosimeter

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. 7). 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 Geschwindigkeitgefälle 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]

Bestimmung der Strömungsform 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 3, 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 Rohrunebenheiten, während in turbulenten Strömungen weitere Wirbel erzeugt werden. [Bsc18]

Tab. 3: 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. 8). 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

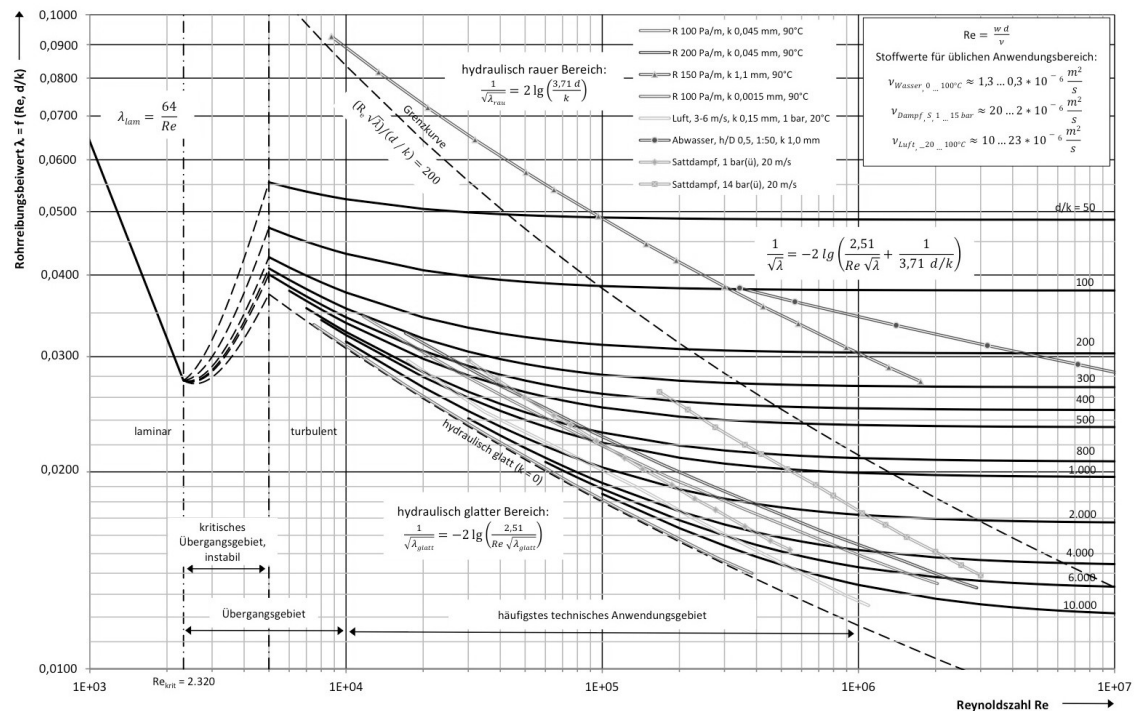


Abb. 8: NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramm [Msi17,]

Gesetz von Hagen-Poiseuille 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]

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{r^4 \cdot \pi} = \frac{128 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{d^4 \cdot \pi} \quad (6)$$

Δp ... Druckverlust

η ... dynamische Viskosität des Fluids

\dot{V} ... Volumenstrom des Fluids

r ... innerer Radius der Rohrleitung

d ... innerer Durchmesser 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.

3.3.2 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 Kreiselpumpen 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.

Oszillierende Verdrängerpumpen Zum einen gibt es die Kategorie der oszillierenden Dosierpumpen. Diese Pumpen kennzeichnen sich dadurch, dass sie ein Fluid durch Hubbewegungen eines Verdrängerkörpers 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 9 und 10).

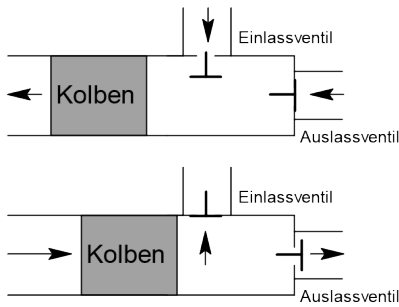


Abb. 9: Skizze einer Kolbenpumpe

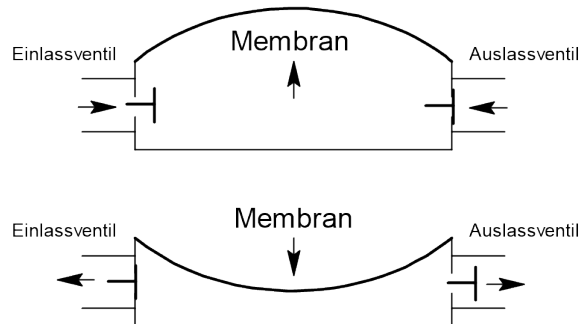


Abb. 10: Skizze einer Membranpumpe

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

Rotierende Verdrängerpumpen Die Kategorie der rotierenden Dosierpumpen ist im Vergleich zu oszillierenden Dosierpumpen deutlich fassettenreicher. Das hierbei genutzte Verdrängervolumen basiert auf Maßtoleranzen, Spaltmaßen und Elastizitäten des Pumpdraumes, 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 11 dargestellt.

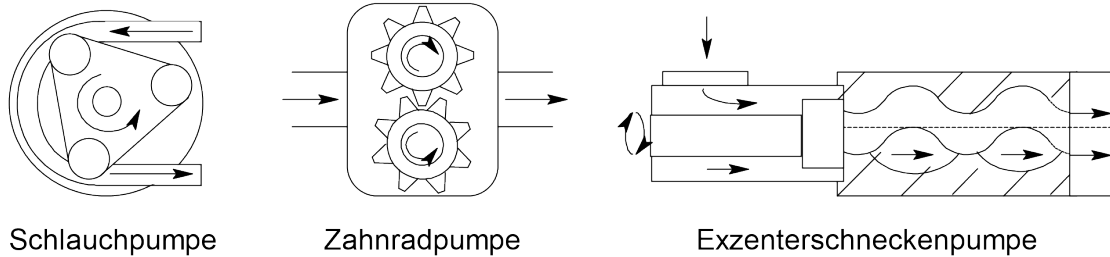


Abb. 11: Skizzen für Rotationspumpen

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 verschiedenen Kriterien wie Wirkungsgrad, förderbare Viskosität, Druckstabilität, sowie weitere nicht genannte Aspekte heranzuziehen. Einen Überblick hierfür verschafft die Literatur in [Bie19, S. 224 ff.], sowie ausführlich beschriebene Auswahlhilfen in Form von Tabellen und Diagrammen in [Vet02, S. 125, 219, 659 ff.].

3.3.3 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, wie zum Beispiel 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 12 ist ein Beispiel für ein redundanzfreies Dosiersystem unter zu Hilfenahme einer Pumpenkennlinie dargestellt. [Vet02]

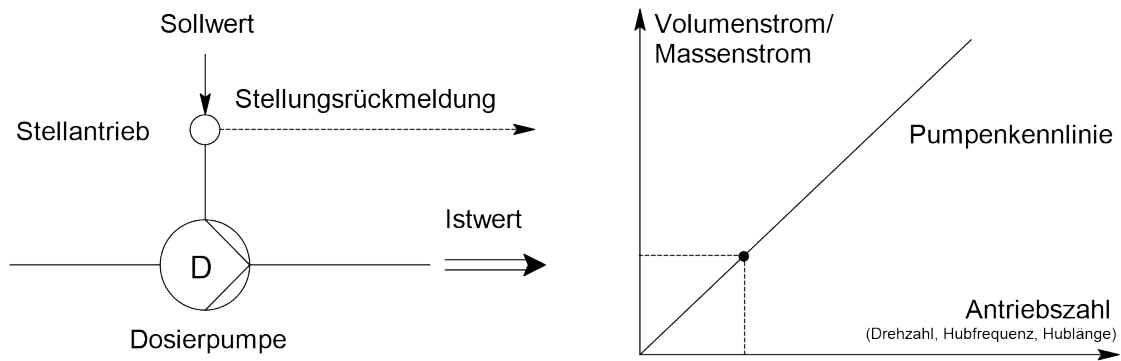


Abb. 12: Skizze für redundanzfreies Dosiersystem, erstellt nach [Vet02]

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 Störung oder Abweichung einer der Komponenten eine Fehlersuche. In Abbildung 13 ist eine beispielhafte Skizze für ein redundant ausgeführtes Dosiersystem mit Dosierpumpe und Durchflussmesser dargestellt. [Vet02]

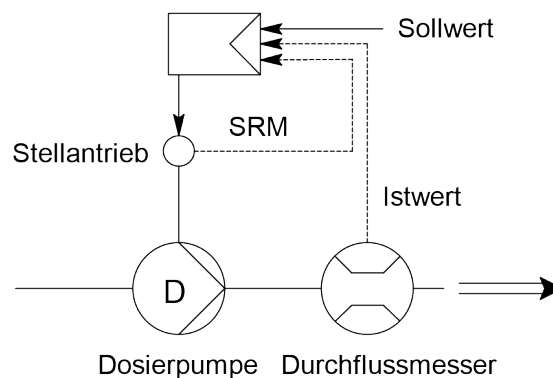


Abb. 13: Skizze für Dosiersystem mit Redundanz, erstellt nach [Vet02]

Eine Möglichkeit für die redundante Bestimmung des Dosierstroms ist einen Coriolis-Massendurchflussmesser als Systemkomponente zu nutzen. Hierbei wird unter Nutzung einer schwingenden Bewegung, welche auf das strömende Fluid einwirkt, die auftretende Corioliskraft zur Messung des Massenstrom 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. Die Messungen dieser zusätzlichen Parameter basieren 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. $0,5 \frac{m}{s}$ 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 dann 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 den bereits genannten Durchflussmessern gibt es auch so genannte Mengemesser. Diese beruhen, wenn sie nicht eine Ausführung der zuvor genannten Durchflussmesser sind, meist auf einem Verdrängerprinzip und fungieren als Volumen- oder Geschwindigkeitszähler. Typische Beispiele hierfür sind Ovalradzähler und Turbinenzähler. Speziell Volumenzähler bestimmen die durchgeflossene Menge an Fluid meist durch 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 durch die mechanische Bewegung oder dem Fluid selbst auch einem gewissen Verschleiß. Zur Bestimmung des Durchflusses ist das gezählte Fördervolumen durch die Förderzeit zusätzlich zu berechnen.

Um den Dosierstrom ohne Rohrleitungseinbauten zu bestimmen, ist es möglich ein Loss-in-Weight oder Loss-in-Volume Verfahren zu nutzen. Mit diesen hauptsächlich für schlecht fließende, inhomogene Schüttgüter genutzten Verfahren wird der Massenstrom mittels Differentialdosierer bestimmt. Dieser Differentialdosierer misst den Dosierstrom im klassischen Sinne mit Hilfe einer Waage durch 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 $\pm 2\text{ mm}$ Messabweichung können diese je nach Behälter bereits mehrere Gramm bis Kilogramm Abweichung bedeuten. [Vet02, VEG22]

3.4 Zeichnerische Umsetzung und Rohrleitungsplanung

Diese Abschnitt beinhaltet die rohrleitungstechnische und zeichnerische Umsetzung einer Anlage oder eines Anlagenteils. In Form einer groben Rohrleitungsplanung, sowie der Erstellung eines R&I Fließbildes und eines EMSR-Stellplanes soll die Grundlage für die Ausführung und Dokumentation einer Anlagenerweiterung ermöglicht werden.

3.4.1 Rohrleitungsplanung

Die Rohrplanung umfasst im wesentlichen das Festlegen von Charakteristiken von Rohrleitungen, wie Anschlüsse, die Rohrlänge, Nennweiten, Nenndrücke oder auch die Wahl des Werkstoffes und Bestimmung der Rohrleitungsklasse. Diese werden durch die nötigen Betriebsparameter bestimmt und stehen im engen Zusammenhang mit vorhandenen Rohrleitungsstrukturen, sowie der Förderpumpe. Beginnend mit dem Durchmesser hat dieser laut Gleichung (6) einen maßgeblichen Einfluss auf den auftretenden Druckverlust in der Rohrleitung. Durch die vierte Potenz des Durchmesser hat dessen Verdopplung einen 16-mal niedrigeren Druckverlust zur Folge. Das bedeutet ebenfalls, dass die Wahl der Rohrnennweite entscheidenden Einfluss auf die Betriebsbedingungen hat. Trifft man die Annahme, dass der Förderdruck durch die Pumpe begrenzt und von einer laminaren Strömung ausgegangen wird, ergibt sich für die Bestimmung des mindestens erforderlichen Rohrdurchmessers die Gleichung (11) nach dem Gesetz von HAGEN-POISEUILLE.

$$d = \sqrt[4]{\frac{128 \cdot \eta \cdot L \cdot \dot{V}}{\Delta p \cdot \pi}} \quad (11)$$

d ... innerer Durchmesser der Rohrleitung
 L ... Länge der Rohrleitung
 \dot{V} ... Volumenstrom
 Δp ... Druckverlust
 η ... dynamische Viskosität

Eine alternative Herangehensweise aus der Literatur trifft die Annahme der Strömungsgeschwindigkeit für das zu fördernde Fluid. Typische Strömungsgeschwindigkeiten für Wasser werden mit 0,3 bis 3 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und für viskose Flüssigkeiten mit 0,3 bis 2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ angegeben. Der erforderliche Rohrdurchmesser berechnet sich dann nach Gleichung (12). Durch die Annahme der Strömungsgeschwindigkeit werden Viskosität und Druckverlust in dieser Berechnung nicht einbezogen und es würden sich ähnliche Rohrleitungsdurchmesser für verschieden viskose Flüssigkeiten ergeben.[Bie19]

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}}{\pi \cdot v}} \quad (12)$$

d ... innerer Durchmesser der Rohrleitung
 \dot{V} ... Volumenstrom
 v ... Strömungsgeschwindigkeit

Ist der erforderliche Rohrleitungsdurchmesser bestimmt, kann aus einer Reihe von bevorzugten DN-Stufen nach DIN EN ISO 6708 gewählt werden. Die Nennweite DN beschreibt dabei jedoch nicht den exakten Innendurchmesser der Rohrleitung, sondern ist das kennzeichnende Merkmal zueinander passender Teile von Rohrleitungssystemen. Für die Auslegung wird die nächsthöhere Nennweite zum berechneten Durchmesser gewählt (vgl. Tabelle 4).[Ign15]

Als weiter Kenngröße für Rohrleitungen ist der Nenndruck PN zu bestimmen, welcher für Rohrleitungen den maximalen Betriebsdruck eines Rohrleitungssystems

mit Rohrleitungsbestandteilen gleicher Nennweiten und gleicher Druckbelastbarkeit bei einer Betriebstemperatur von 20 °C angibt. Erhöht sich die Betriebstemperatur verringert sich auch der maximal zulässige Betriebsdruck, trotz gleichem Nenndruck. Aus dem realen maximalen Betriebsdruck und der Betriebstemperatur wird dann ähnlich wie bei der Nennweite der Nenndruck der Leitung gewählt. Ist die Nennweite ebenfalls festgelegt, kann nun anhand von Tabellen bestimmt werden, welche Wandstärken und Rohrmaße für den jeweiligen Rohrleitungsbestandteil vorliegen. Je nach Druckstufe und Nennweite können sich auf diese Weise verschiedene Wandstärken der Rohre und somit verschiedene Rohrinne Durchmesser trotz gleicher Nennweite ergeben. In den üblichen Druckstufen bis PN16, sowie üblichen Nennweiten bis DN150 bleiben diese Werte jedoch konstant und unterscheiden sich lediglich bei höheren Nenndrücken und Nennweiten. Der Außendurchmesser der Rohrleitung bleibt hingegen in jedem Fall konstant. (vgl. Tab. 4). [Ign15]

Tab. 4: Maße für Stahlrohre in Millimetern aus unlegierten Stählen in Abhängigkeit von Nennweite und Nenndruck (Richtwerte), erstellt nach [Ign15]

Maß	PN	DN10	DN15	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN65	DN80	DN100	DN200	DN250
d_a	2,5												
	6												
	10	17,2	21,3	26,9	33,7	42,4	48,3	60,3	76,1	88,9	114,3	219,3	273,0
	16												
s	25												
	2,5												
	6											5,9	6,3
	10	1,8	2,0	2,3	2,6	2,6	2,6	2,9	2,9	3,2	3,6		
d_i	16											6,3	7,1
	25												
	2,5												
	6												
d_i	10	13,6	17,3	22,3	28,5	37,2	43,1	54,5	70,3	82,5	107,1	207,3	260,4
	16												
	25											206,5	258,8

d_a ... Außendurchmesser, s ... Wandstärke, d_i ... Innendurchmesser

Um die Rohrleitung nun in Auftrag geben zu können ist sind neben der Rohrleitungslänge und Form, die Angabe der zu nutzenden Rohrverbindung und die Werkstoffwahl nötig. Die in der Chemie am meisten verwendete lösbare Verbindung ist die Flanschverbindung. Sie besteht aus je zwei Flanschen, einer Dichtung, sowie den dazu passenden Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben. In Ausführung als Vorschweißflansch und mit der richtigen Werkstoffauswahl ist diese lösbare Rohrverbindung für viele übliche Drücke und Temperaturen einsetzbar. Neben Flanschen gibt es auch weitere lösbare Rohr- und Schlauchverbindungen, wie beispielsweise die KAMLOCK-Kopplung. Sie wird als Schnellverschluss hauptsächlich für Entleerungsschläuche bei niedrigen Drücken und Umgebungstemperaturen genutzt. Soll sind jedoch auch weitere Verbindungen wie Schweiß-, Schraub- oder Muffenverbindungen möglich, welche je nach Anwendungsbereich gewisse Vorteile gegenüber den genannten Möglichkeiten darstellen können.[Ign15] Für die Wahl des Rohrwerkstoffes sind zunächst die korrosiven Eigenschaften des zu fördernden Stoffes nötig. Sind diese bestimmt ist der Rohrwerkstoff so zu wählen, dass der Prozessstoff den Rohrwerkstoff nicht korrodiert. Für hohe Reinheitsanforderungen werden deshalb in Rohrleitungen oft nicht rostende Stähle verwendet.

Bei der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH verbaute Rohrleitungen für Chemikalien bestehen typischer Weise aus V2A-Stahl mit Glattflansch in der Form B1 und sind mit NOVAFLON 200 abgedichtet. Für korrosivere Medien kommt aber zum Teil auch V4A-Stahl zum Einsatz.

Um die bestimmte Rohrleitung in der Anlage nun spezifizieren zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Rohrleitungsspezifikation der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH nutzt dafür eine abgewandelte Form der Rohrklassen nach PAS 1057. Der Rohrleitungsname setzt sich dabei aus dem in Tabelle 5 aufgeführten Namenssystem zusammen.

Tab. 5: Rohrleitungsspezifikation der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH

	Rohrklasse									Medium					
	Typ	-	Material	-	DN	-	PN	-	Isolierung	-	Medium	-	Aggregatzustand	-	Nummer
Parameter	RO		2A		Nennweite		Druckstufe		IA		frei		F		Nummernkreis und Zählnummer
			4A						IG			G			
	RU		ST						I0			P			
			PP												
			PE												
			GF												
Rohrname	R0	-	2A	-	50	-	16	-	IA	-	STY	-	F	-	110.01

R0 ... Rohrleitung überirdisch, RU ... Rohrleitung unterirdisch

2A ... V2A, 4A ... V4A, ST ... Stahl, PP ... Polypropylen, PE ... Polyethylen, GF ... Glasfaser

IA ... Isolierung Außenbereich, IG ... Isolierung Generell, I0 ... keine Isolierung

F ... Flüssig, G ... Gasförmig, P ... Fest

3.4.2 Darstellung der Chemieanlage

Fließbilder stellen eine zeichnerische Darstellung der chemischen Anlage oder Anlagenbestandteilen dar und sollen übersichtlich und einprägsam den Aufbau der Anlage oder eines Verfahrens aufzeigen können. In der Zeichnung werden demnach Stoff- und Energieströme, Apparate, Armaturen und Maschinen zusammengefasst um möglichst schnell und effizient einen Überblick zu bekommen. Da je nach betrachteten Aspekt der Anlage verschiedene Anforderung an eine solche Anlagendarstellung gestellt werden, existieren deshalb die Formen Grundfließbild, Verfahrensließbild und Rohrleitungs- und Instrumentationsfließbild (R&I-Fließschema). Sie unterscheiden sich neben der Nutzung verschiedener grafischer Symbole und Fließlinie vor allem in Detailgrad der Anlagenbeschreibung. Dabei stellt das Grundfließbild lediglich das reine Verfahren mit Stoff- und Energieströmen dar, während im R&I-Fließschema jegliche Anlagenkomponenten wie Pumpen, Ventile und Behälter aufgeführt und benannt sind. In den Normen DIN 2800-3 (2014) und DIN EN ISO 10628-1 (2013) sind die verschiedenen Fließschemata genormt. Die dafür zu verwendenden Symbole, Kennungen und Fließlinienformatierungen sind ergänzend in den Normen DIN EN ISO 10628-2 (2013) und DIN 28000-3 und DIN 28000-4 (2014) beschrieben. Beispielfhaft ist in Abbildung 14 ein R & I - Fließbild dargestellt. [Ign15]

R & I - Fließbild (vereinfacht)

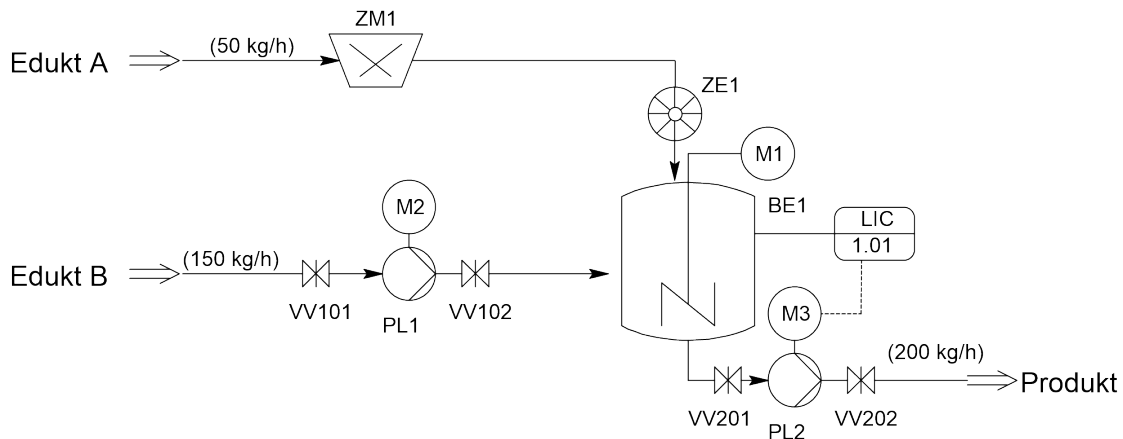


Abb. 14: Vereinfachtes R&I - Fließbild

3.4.3 EMSR-Stellenplan

EMSR-Stellenpläne, auch Instrumentation Loop Diagrams genannt, sind die detaillierteste Darstellungsform für Regel- und Steuerungssysteme und enthalten demnach jegliche Informationen, die in einem R&I Fließbild weggelassen werden. Für alle im R&I dargestellten prozessleittechnischen Stellen (PLT-Stellen) sind solche Stromlaufpläne zu erarbeiten und sollen den Signalweg der Instrumentierung verdeutlichen. Ein solcher EMSR-Stellenplan soll desweiteren helfen die PLT-Stelle in Betrieb zu nehmen und im Betrieb die Störungssuche erleichtern. Der Stellplan ist dabei in verschiedene Sektionen unterteilt, um die Informationen aus dem Feld bis hin zum Prozessleitsystem nachvollziehen zu können. Die Benennung dieser Einteilungen kann sich je nach Einrichtung unterscheiden, jedoch zeigt jede Sektion einen Teil des Regelkreises und die Instrumente, die in ihm enthalten sind.

Unter der Bezeichnung *Feld* sind die im Feld installierten Instrumente, sowie die dazugehörigen Verteilerboxen dargestellt. Die Verteilerboxen haben dabei die Funktion als Verbindungspunkte für die Signalleitungen und werden normalerweise nicht im R&I Fließbild dargestellt. Danach folgt in der nächsten Sektion der *Instrument technical room*. In diesem Abschnitt kommen die Stammkabel der Verteilerboxen aus dem Feld auf der A-Seite des Rangierschranks zusammen und werden passend zur B-Seite des Schrankes rangiert. Ein weiteres Stammkabel verbindet nun die Rangierseite B und die Ex-Kabine. In dieser Ex-Kabine münden die 4 bis 20 mA Messsignale dann auf Intrinsically Safety Termination Assembly Boards (ISTA Boards), um eine Potentialtrennung für den Ex-Bereich sicher zu stellen. Ausgehend davon sind diese Boards dann über Bus-Kabel auf ein entsprechendes Field Bus Module (FBM) im Distributed control system (DCS) verknüpft, die das Messsignal in eine Binärstruktur übersetzen und dann im Prozessleitsystem weiterverarbeiten lassen. Beispielhaft ist ein solches Instrumentation loop diagram für einen Durchflussmesser in in Abbildung ?? dargestellt. Es sei jedoch erwähnt, dass sich solche Pläne je nach Institution und Anwendung in ihren Bezeichnungen und ihrer Komplexität stark unterscheiden können.

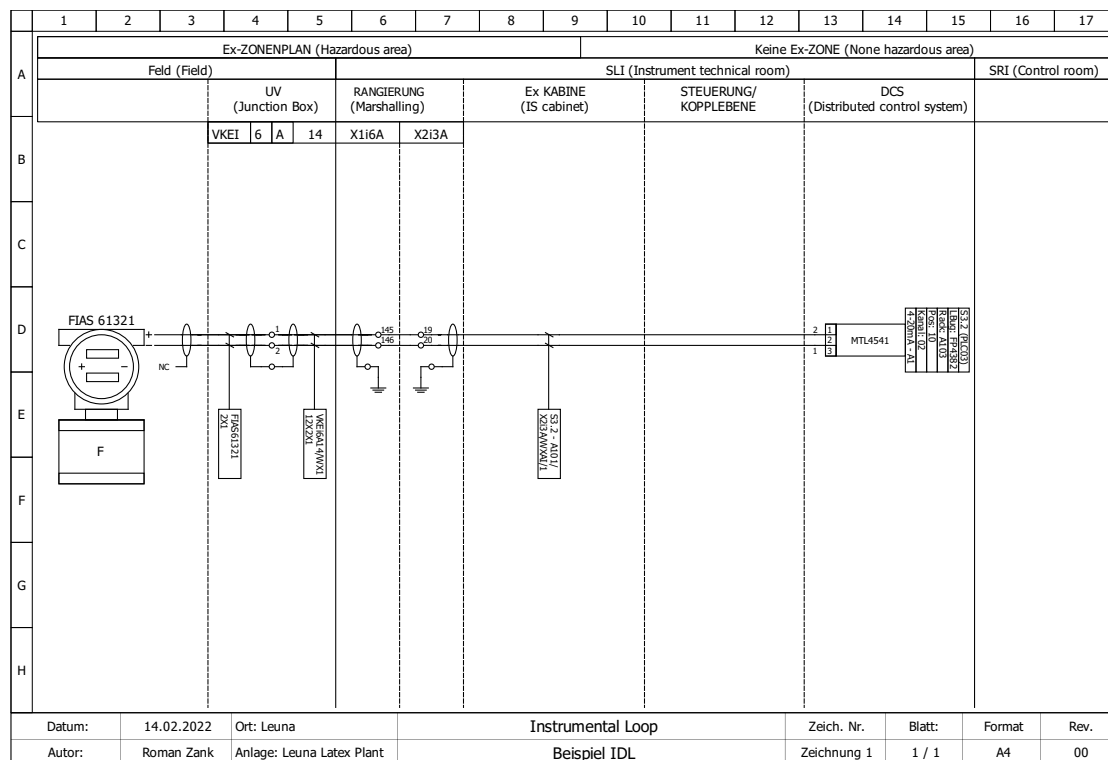


Abb. 15: Beispiel eines EMSR-Stellenplans

3.5 Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren

Da sich diese Bachelorarbeit mit der Findung einer Lösung für eine Problemstellung beschäftigt, wird sich in diesem Abschnitt kurz der Lehre der Heuristik zugewandt. Allgemein beschäftigt sich diese Wissenschaft mit Verfahren um Probleme zu lösen. Im Vordergrund stehen hierbei methodische Anleitungen, Anweisungen und Denkalgorithmen zu schaffen, welche zur Gewinnung neuer Erkenntnisse führen. [Dud22] Eine Kategorie dieser Verfahren sind allgemein heuristische Entscheidungsverfahren. Das Wort „allgemein“ bedeutet in diesem Fall, dass die Methodik des Entscheidungsverfahrens nicht für ein spezielles Entscheidungsproblem konzipiert ist, sondern durchaus für verschiedenste Entscheidungsprobleme nutzbar ist. Möglichkeiten, die sich aus der Anwendung eines allgemein heuristischen Verfahrens ergeben sind, dass sie:

- zur Lösung beliebiger Entscheidungsprobleme geeignet sind,
- die Zielorientierung erhöht wird und damit Fehlentscheidungen vermieden werden und
- die Trennung von Faktenwissen und persönlicher Bewertung die Entscheidungsqualität erhöht.

Jedoch ergeben sich mit diesen Möglichkeiten auch Grenzen wie zum Beispiel, dass:

- allgemein heuristische Entscheidungsverfahren weniger effektiv und effizient sind als ein existierendes spezielles Entscheidungsverfahren,

- die Vermeidung von Fehlentscheidungen nicht garantiert werden kann und
- mangelndes Fachwissen dadurch nicht kompensiert wird.

Solche Entscheidungsverfahren sind beispielsweise durch die Autoren RUDOLF GRÜNING und RICHARD KÜHN, ROLF BRONNER oder EGBERT KAHLE in der Literatur beschrieben.

4 Material und Methoden

4.1 Entscheidungsverfahren nach Grüning und Kühn

Im allgemein heuristischen Entscheidungsverfahren nach GRÜNING und KÜHN beschreiben die Autoren auf welcher Grundlage die Entwicklung ihres Verfahrens beruht. Diese umfasst unter anderem heuristische Prinzipien, Entscheidungsmaximen, Erfahrungen der Autoren als Berater für komplexe Entscheidungssituationen, Erfahrung aus der Entwicklung spezieller heuristischer Entscheidungsverfahren, sowie existierenden allgemein heuristischen Entscheidungsverfahren von anderen Autoren. Mehr dazu, sowie die Beschreibung der Arten von Entscheidungsproblemen findet sich in der Literatur [GK13]. Das Verfahren von GRÜNING und KÜHN umfasst dabei sieben Schritte, welche über Schrittsequenzen miteinander verknüpft werden (siehe Abbildung 16).

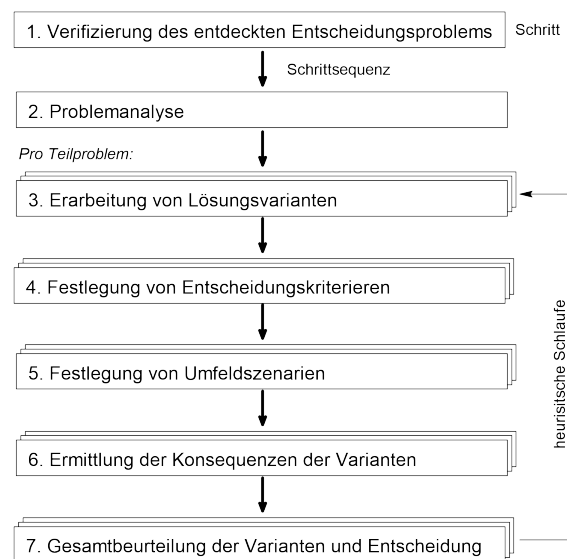


Abb. 16: Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren, erstellt nach [GK13]

Werden in der Problemanalyse mehrere Teilprobleme festgestellt sind die Schritte 3 bis 7 für jedes Einzelproblem zu durchlaufen. Die Rückführung, die durch diese Entscheidungsprozesse entsteht wird „heuristische Schläufe“ genannt und ist mit dem am häufigsten auftretenden Vertreter in der Entscheidungsfindung in Abbildung 16 darstellt. Solche Rückführungen der Entscheidungsschritte können in allen Prozessschritten vorkommen und somit kann es in jeder Teilaktivität zu solch heuristischen Schlaufen kommen. So kann es passieren, dass die Entscheidungskriterien unter Schritt 4 angepasst werden müssen, während bereits in Schritt 6 die Konsequenzen der Lösungsvarianten bestimmt werden. Um das Verfahren anwenden und besser verstehen zu können, werden die einzelnen Schritte des Entscheidungsverfahrens kurzerhand näher erläutert.

Schritt 1: Verifizierung des entdeckten Entscheidungsproblems In diesem Schritt ist zu prüfen ob die Bearbeitung des Entscheidungsproblems lohnenswert ist und in wie fern sich Soll- und Ist-Zustand voneinander abweichen und auf verlässliche Informationen zurückführen lassen. Lässt sich die Bearbeitung des Problems als lohnenswert und die Beschreibung des Soll- und des Ist-Zustandes auf valide Informationen zurückzuführen ist, gilt das Problem als verifiziert. Je nach

Wichtigkeit und Dringlichkeit wird dann festgelegt wer und in welchem Zeitraum an dem Entscheidungsproblem gearbeitet werden soll. Ist keine Aussage zur Wichtigkeit und Dringlichkeit möglich wird von beiden der Worst-Case angenommen.

Schritt 2: Problemanalyse In diesem Schritt wird die Problemstellung abgegrenzt und strukturiert. Im Zuge dieser Analyse erfolgen dann Recherchen und Ermittlungen von relevanten Informationen, um die Problemursachen festzustellen und das Problem in mehrere Teilprobleme zu zerlegen. Danach wird festgelegt welche dieser einzelnen Probleme parallel oder nacheinander bearbeitet werden können. Diese Struktur ist maßgeblich für das Vorgehen in den folgenden Schritten.

Die folgenden Schritte 3 bis 7 werden mit jedem Teilproblem einzeln durchgeführt und es kann gegebenenfalls zu heuristischen Schlaufen innerhalb dieser Bearbeitungsschritte kommen. Je nach vorgegebener Struktur unter Schritt 2 kann die Bearbeitung dieser Teilprobleme unterschiedlich angegangen werden.

Schritt 3: Erarbeitung von Lösungsvarianten In diesem Schritt des Entscheidungsverfahrens werden mindestens zwei oder mehr Lösungsvarianten für das Teilproblem erarbeitet. Um den weiteren Bewertungsprozess des Entscheidungsverfahrens rechtfertigen zu können, ist bei der Erarbeitung der Varianten zu beachten, dass sich diese in wesentlichen Merkmalen und nicht nur in Details unterscheiden.

Schritt 4: Festlegung von Entscheidungskriterien Sind die Lösungsvarianten bestimmt, gilt es sich als nächstes die Entscheidungskriterien festzulegen anhand derer die Varianten evaluiert werden sollen. Die Beschreibung dieser Kriterien besteht dabei durch konkret definierte Maßstäbe anhand derer eine Einschätzung erfolgen kann.

Schritt 5: Festlegung von Umfeldszenarien Dieser optionale Schritt des Entscheidungsprozesses fordert den Akteur der Entscheidung dazu auf, falls nötig, verschiedene Szenarien des Umfeldes zu beschreiben und Eintrittswahrscheinlichkeiten dafür zu definieren. In der Risiko- und Gefahrenanalysen nach dem HAZOP-Verfahren findet eine solche Beurteilung des Umfeldes beispielsweise statt.

Schritt 6: Ermittlung der Konsequenzen der Varianten: Die zuvor überlegten Entscheidungskriterien und die optionalen Umfeldszenarios werden mit den erarbeiteten Lösungsvorschlägen in einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst und die sich daraus ergebenden Konsequenzwerte eingetragen. Die Konsequenzwerte werden hierbei durch eingehende Recherchen und dem Wissen und der Erfahrung des Akteurs bestimmt und können daher auch einer gewissen Subjektivität unterliegen.

Schritt 7: Gesamtbeurteilung der Varianten und Entscheidung Im letzten Schritt werden die einzelnen Lösungsvarianten in ihrer Gesamtheit beurteilt. Dafür werden irrelevante Varianten eliminiert und danach bestimmt ob für die Wahl der Lösungsvariante ein analytisches oder summarisches Vorgehen bevorzugt wird. Dies entscheidet sich dadurch ob lediglich ein (Einwertigkeit) oder mehrere voneinander unabhängige Entscheidungskriterien (Mehrwertigkeit) die Alternativen unterscheiden und ob es unkontrollierbare Situationen gibt, die für die Variantenwahl entscheidend sind. Im Normalfall kann bei komplexen Problem davon ausgegangen werden, dass diese mehrwertig sind und/oder eine gewisse Unsicherheit oder Ungewissheit der Situation in sich tragen. Laut [GK13]

Münch
nachfra-
gen ob
diese Ris-
kotabelle
nur für
HAZOP
galt

wird daher ein analytisches Vorgehen bevorzugt bei der Hilfswerte gebildet und verrechnet werden können. Alternativ dazu können sich bei einwertigen und/oder sicheren Entscheidungen auch summarisches Vorgehen eignen, da diese durch Abwägung der Vor- und Nachteile der Varianten weniger komplex und besser interpretierbar sind. In der Literatur sind für die jeweiligen Vorgehensweisen verschiedene Methoden, sogenannte Entscheidungsmaximen beschrieben, welche die Überwindung von Mehrwertig, Unsicherheit oder Ungewissheit möglich machen. Eine Möglichkeit der Überwindung der Mehrwertigkeit und der Unsicherheit ist zum Beispiel die auf BERNOULLI zurückgehende Maxime des Nutzenerwartungswertes. Ist die Bestimmung der Varianten für die einzelnen Teilprobleme nach analytischen oder summarischen Vorgehen erfolgt, können infolgedessen die vorgeschlagenen Varianten der Teilprobleme mit einander abgestimmt werden. Bildet sich dabei keine heuristische Schleife fällt die Entscheidung über die zu realisierende Variante.

4.1.1 Nutzenwertmaxime

Für das analytische Vorgehen bei der Gesamtbeurteilung der Varianten kann die Nutzenwertmaxime zur Überwindung von Mehrwertigkeit genutzt werden. Sie unterscheidet sich von der Maxime des Nutzenerwartungswertes nach BERNOULLI durch die fehlende Einbeziehung des Erwartungswertes und überwindet somit auch keine Unsicherheiten. Das muss jedoch bei sicheren Situationen der Entscheidung keinen Nachteil mit sich bringen. Die Entscheidung einer Variante mittels Nutzenwertmaxime umfasst vier Teilaufgaben:

Schritt 1: Umrechnung nicht-numerischer Konsequenzwerte

Nicht-numerische Konsequenzwerte sind anhand einer definierten Skala in Zahlenwerte umzurechnen.

Schritt 2: Umrechnung der Konsequenzwerte in Nutzenwerte

Für jedes Entscheidungskriterium hat die Summe an Nutzenwerten der Variante „1“ zu betragen. Die Nutzenwerte der Varianten sind dabei so zu bestimmen, dass die Nutzenwerte zwischen 0 und 1 liegen und dass die günstigste Konsequenz den höchsten Nutzenwert besitzt.

Schritt 3: Gewichtung der Entscheidungskriterien

Die Summe der Gewichtungen der Entscheidungskriterien sollte auch an dieser Stelle wieder 1 betragen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die rein subjektiven Gewichte sollten hierbei die relative Bedeutung für die Zielerreichung widerspiegeln.

Schritt 4: Bestimmung der Gesamtkonsequenzen

Die Nutzenwerte von jedem Entscheidungskriterium werden mit ihren Gewichten multipliziert und die gewichteten Nutzenwerte pro Entscheidungskriterium addiert. Die Variante mit dem höchsten Nutzenwert entspricht dann dem Entscheidungswert.

Vielleicht noch Nutzenwerttabelle zur Veranschaulichung ergänzen ?

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Um nähere Erkenntnisse über das Verdickungsmittel TAFIGEL PUR 85 der MÜNZING CHEMIE GMBH zu gewinnen und eine dem Fluid gerechte Auslegung zu gewährleisten sind Untersuchungen Vorversuche unternommen worden. Hierbei

ist zunächst für die strömungstechnische Auslegung die dynamische Viskosität bestimmt worden und infolgedessen untersucht worden welchen Einfluss Verdünnung und Erwärmung auf das Verdickungsmittel haben. Zudem wurden Pumpversuche mit einer Schlauchpumpe durchgeführt, um Erkenntnisse über die Pumpbarkeit zu gewinnen.

4.2.1 Untersuchung der Temperaturabhängigkeit:

Durch die Verfügbarkeit eines digitalen BROOKFIELD DV-I PRIME Rotationsviskosimeters sind die Messungen der dynamischen Viskosität Vorort erfolgt. Um die für das Verdickermittel angegebene Viskosität von ca. $35 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ aus dem Sicherheitsdatenblatt (vgl. [Mun20]) zu überprüfen, wurden zunächst Untersuchungen bei 20°C nach DIN EN ISO 2555 durchgeführt. Genutzt worden sind ca. 400 mL des Verdickungsmittels, die in ein 600 mL Becherglas gefüllt wurden. Auf ein thermostatisches Flüssigkeitsbad ist aufgrund konstanter Raumtemperatur verzichtet worden. Gemessen wurde die Viskosität in fünf Messreihen mit einer Drehzahl von 50 rpm mit Spindel 7 des angegebenen Viskosimeters. Diese Spindel ist beim gegebenen Rotationsviskosimeter und 50 rpm für einen Viskositätsbereich von 8000 bis $80\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ausgelegt und wurde nach jeder Messreihe gespült und getrocknet. Zusätzlich ist eine Viskositätsmessung mit der gleichen Spindel, bei gleicher Drehzahl und Temperatur für ein 50 mL Becherglas durchgeführt worden. Nach der Überprüfung der im Sicherheitsdatenblatt angegebenen Viskosität ist die Abhängigkeit von der Temperatur ebenfalls in Anlehnung an die DIN EN ISO 2555 untersucht worden. Auch hierbei ist, wie in der Viskositätsmessung bei 20°C , auf ein temperiertes Flüssigkeitsbad verzichtet worden und die Proben wurden stattdessen im Trockenschrank erwärmt. Nachdem die Proben aus dem Trockenschrank entnommen wurden, ist sofort die Temperatur und in direkter Folge die Viskosität gemessen worden. Möglich ist dieses Vorgehen, da sich während der Durchführung zeigte, dass in der Zeit vor und nach der Viskositätsmessung keine signifikante Temperaturänderung registriert wurde. Es sind vier Messreihen mit einem Temperaturunterschied von je ca. 5 K durchgeführt worden. Neben der Viskosität wurde auch die Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur bedacht, jedoch ist diese nicht im hauseigenen Labor der ALBERDINGK BOLEY LEUNA bestimmt worden. Die entsprechenden Daten über den Dichteverlauf wurden beim Hersteller angefragt und sind mit einer E-Mail der Abteilung Forschung und Entwicklung beantwortet worden.

4.2.2 Untersuchung der Verdünnungsabhängigkeit:

Da es sich beim Verdickungsmittel um ein in wässriger Lösung emulgiertes Polymer handelt wird dem Einfluss der Temperatur auch die Verdünnung bzw. die Konzentration an Aktivsubstanz betrachtet. Untersucht wurden hierfür die Sedimentationstabilität des Verdickungsmittels mit und ohne Verdünnung, sowie Viskositätsmessungen verschiedener Verdünnungsreihen. Letzteres wurde zum Vergleich parallel mit dem aktuell genutzten Verdickungsmittel Rheobyk-H 3300 VF der BYK-CHEMIE GMBH durchgeführt.

Geprüft wurden die dynamische Viskositäten der Verdickermittel TAFIGEL PUR 85 und Rheobyk-H 3300 VF in Abhängigkeit von der Verdünnung erneut nach der DIN EN ISO 2555 ohne thermostatisches Flüssigkeitsbad mit einem digitalen BROOKFIELD DV-I PRIME Rotationsviskosimeter. Die Raumtemperatur von

20 °C blieb während der Messung konstant. Die Wahl der Spindel , sowie der Drehzahl hing stark von der jeweils vorliegenden Viskositäten, dem Durchmesser des Becherglases und dem Messbereich des Viskosimeters ab. Lag eine Konfiguration des Viskosimeters außerhalb eines für die Probe nötigen Messbereiches, wurde man durch ein Blinken des Displays darauf aufmerksam gemacht. Genutzt wurden die Spindeln 4 bis 7, sowie die Drehzahlen 20, 50 und 100 rpm und sind für die jeweiligen Messreihen in Tabelle 7 angegeben. Mehr zur Auswahl der Spindeln in Abhängigkeit von Drehzahl und Viskosität ist in der Tabelle 6 zu finden.

Tab. 6: Viskositätsbereiche der verschiedenen Spindeln in Abhängigkeit von der Drehzahl, erstellt nach [Ste16]

Spindel		1	2	3	4	5	6	7
Viskosität in mPa · s	20 rpm	<500	200-2000	500-5000	1000-10000	2000-20000	5000-50000	20000-200000
	50 rpm	<200	80-800	200-2000	400-4000	800-8000	2000-20000	8000-80000
	100 rpm							

Für die Messreihen ist das jeweilige Verdickungsmittel zusammen mit Wasser in einem 50 mL Becherglas vermischt worden. Aufgrund einer Knappheit an Verdickungsmittel im Labor durch das parallel getestete Sedimentationsverhalten wird bewusst ein 50 mL-, statt einem 600 mL-Becherglas genutzt. Dass damit die Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Viskositätsmessungen vermindert wird, ist in der Diskussion der Ergebnisse unter Abschnitt 6 berücksichtigt. Pro Verdickungsmittel sollten die Messungen jeweils mit einem Massenanteil an Verdickungsmittel von 100 % beginnen und in 10 %-Schritten reduziert werden, sodass am Ende pro Verdickungsmittel neun Viskositätsmessungen durchgeführt wurden. Die Messung bei 0 % Verdickungsmittelanteil ist nicht vollzogen worden. Auch bei diesen Viskositätsmessungen sind bei mehrfacher Anwendung die Spindeln zwischen den Messungen gespült und getrocknet worden.

Tab. 7: Messparameter und Massenanteile für verdünnte Viskositätsmessungen

Nr.	Spindel	n [rpm]	m_{VD} [g]	m_{H_2O} [g]	m_{ges} [g]	$w\%_{VD}$ [%]
TAFIGEL PUR 85						
1	4	100	9,9	39,6	49,5	20
2	5	100	13,3	31,1	44,4	30
3	5	100	19,0	28,5	47,5	40
4	5	50	24,8	25,0	49,8	50
5	5	50	29,5	19,9	49,4	60
6	5	50	35,7	14,8	50,5	71
7	5	20	40,0	10,3	50,3	79
8	6	20	45,0	8,8	53,8	84
9	7	50	50,0	0,0	50,0	100
Rheobyk-H 3300 VF						
1	5	100	5,2	47,0	52,2	10
2	5	50	10,4	42,1	52,4	20
3	5	50	15,2	35,6	50,8	30
4	5	50	22,2	32,5	54,7	41
5	6	100	23,9	26,4	50,32	48
6	6	50	29,0	21,5	50,5	57
7	6	100	40,4	9,7	50,1	81
8	6	100	49,1	0,0	49,1	100

n ... Drehzahl, m_{VD} ... Masse an Verdickungsmittel, m_{H_2O} ... Masse an Wasser, m_{ges} ... Gesamtmasse an Lösung, $w\%_{VD}$... Massenanteil Verdickungsmittel

Für die Überprüfung, ob das Verdickungsmittel mit der Zeit sedimentiert, wurden 150 mL des Verdickungsmittels TAFIGEL PUR 85 in einen offenen 500 mL Messzylinder mit ± 10 mL Messtoleranz gegeben. Danach ist dieser Zylinder für einen Monat unter einem Abzug stehen gelassen worden. Die Erscheinungsform des Verdickungsmittels ist zu Beginn am 08.11.2021, dazwischen am 11.11.2021 und 17.11.2021, sowie am Ende dem 08.12.2021 fotografisch dokumentiert worden. Daraufgehend wurde das in der Untersuchung verwendete Verdickungsmittel mit einer undefinierten Menge an Wasser verdünnt. Durch dieses Vorgehen ist der Anteil an Verdickersubstanz nun über den Feststoffanteil bestimmt und mit den noch folgenden Verdünnungs-Viskositäts-Kurven verifiziert worden. Diese Lösung wurde dann beschriftet in eine Probenflasche mit Deckel abgefüllt und über zwei Monate stehen gelassen. Hiermit soll die überprüft werden ob eine Sedimentation des Verdickungsmittel bei höherem Lösemittelanteil eintritt. Die Überprüfung der Sedimentation erfolgte lediglich optisch und wurde zu Beginn am 08.12.2021 und am Ende 08.02.2022 fotografisch dokumentiert.

4.2.3 Pumpversuche

4.3 Recherchearbeit: Literaturarbeit, Fachgespräche und Angebotsanfragen

Vielleicht eher später schreiben ?

4.4 Gefährdungsbeurteilung (HAZOP-Verfahren)

4.5 Computerunterstütztes Zeichnen mit AutoCAD und QElectroTech

5 Ergebnisse

5.1 Verifizierung und Analyse des Dosierproblems

5.1.1 Ist-Zustand: Aktuelles Dosierverfahren und Produktionsweise

5.1.2 Soll-Zustand: Anforderung an die Dosierung

5.1.3 Eigenschaften des Verdickungsmittels

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]

5.1.4 Viskositätsmessungen

–i nach DIN

5.1.5 Verdünnungsverhalten

–i Eigenregie

5.1.6 Erwärmungsverhalten

–i beim Hersteller angefragt

5.1.7 Pumpversuche

Entscheidungsprobleme werden aufgrund des Umfangs und der schweren Nachvollziehbarkeit nicht dargestellt

5.2 Problem: Entscheidung für ein Verfahren

5.3 Problem: Entscheidung für Gebindetyp

5.4 Problem: Direkte Zugabe mit Pumpe oder Dosierbehälter

5.5 Problem: Auswahl des Pumpentyps

5.6 Problem: Messverfahren

5.7 Technische Planung für Verdickungsmitteldosierung

5.7.1 Verfahrensflißbild der Verdickerdosierung

5.7.2 R&I- Flißbild der Verdickerdosierung

5.7.3 Theoretische Rohrleitungsplanung der Verdickerdosierung

5.7.4 Signalverarbeitungsplanung der Verdickerdosierung

5.8 Gefährdungsbeurteilung der geplanten Verdickungsmitteldosierung

6 Diskussion

Viskositätsmessung nach DIN EN ISO 2555, statt DIN EN ISO 3219 –> laut DIN EN ISO 2555 macht das Messverfahren für newtonsches Fluid keinen Unterschied
Trockenschrack könnte Lösungsmittel entfernen –> nicht signifikant –> dennoch geringere Viskosität durch Erwärmung

Becherglas 50 ml bei Verdünnungsmessung –> Anhaltspunkt für Verlauf –> reicht für weitere Auswertung, da ungefähr selbes ergebnis bei 600 ml Becherglas

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen


Literatur

- [BB18] BGN-BRANCHENWISSEN ; BERUFGENOSSENSCHAFT NAHRUNGSMITTEL UND GASTGEWERBE (Hrsg.): *Leitfaden ATEX 137: 3. Technische Maßnahmen des Explosionsschutzes*. <https://www.bgn-branchenwissen.de/daten/gv/atex137lf/3.htm>. Version: 08.10.2018, Abruf: 08.02.2022. – Copyright: copyright BC GmbH Verlags- und Mediengesellschaft, 2010
- [bgc22] BERUFGENOSSENSCHAFT ROHSTOFFE UND CHEMISCHE INDUSTRIE (Hrsg.): *1.1 Was enthält die EG-Richtlinie 2014/34/EU?* <https://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen/antworten-auf-haeufig-gestellte-fragen/mess-und-warngerate/11-was-enthaelt-die-eg-richtlinie-201434eu>. Version: 10.02.2022, Abruf: 10.02.2022
- [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/ametekbrookfield/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 und 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
- [Dud22] DUDEN: *Heuristik*. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Heuristik>. Version: 10.02.2022, Abruf: 10.02.2022

- [ECO16] ECOM INSTRUMENTS GMBH (Hrsg.): *ATEX Kennzeichnung - ECOM Mobile Safety (Plakat)*. https://www.ecom-ex.com/fileadmin/user_upload/documents/ATEX_Platat_ecom_05-16_DE.jpg. Version: 23.06.2016, Abruf: 10.02.2022
- [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>
- [GK13] GRÜNIG, Rudolf ; KÜHN, Richard: *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31460-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31460-5>. – ISBN 978-3-642-31459-9
- [Hol10] HOLZE, Rudolf: *Nichtnewtonsche Flüssigkeiten*. Thieme Gruppe, 2010 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-14-01075>
- [Hü22] HÜTHIG GMBH: *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
- [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

- [Mun20] MÜNZING CHEMIE GMBH (Hrsg.): *Sicherheitstechnisches Datenblatt - TAFIGEL PUR 85*. https://www.munzing.com/static/b67edf68ea3d380bb5a443262f0eb954/msds_TAFIGEL_PUR_85_01_DE_1e090ce1bd.pdf. Version: 04.03.2020, Abruf: 14.02.2022
- [RRM08] RÖMPP-REDAKTION ; MILLOW, Sieghard: *Viskosimeter*. Thieme Gruppe, 2008 <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-22-00922>
- [SAP22] SAP SE (Hrsg.): *Production Campaign - SAP Help Portal*. <https://help.sap.com/viewer/698b19fa88b846359bc611f11184c810/6.18.latest/en-US/7280bf53f106b44ce10000000a174cb4.html>. Version: 04.02.2022, Abruf: 08.02.2022
- [Ste16] STEFFI REINHARDT ; ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH (Hrsg.): *Prüfvorschrift - Bestimmung der Viskosität - LL/PV 170 QC 005a*. Leuna, 11.10.2016
- [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]	12
2	Einteilung von Assoziativ-Verdickern nach chemischer Struktur [BRRS09]	12
3	schematische Struktur eines assoziativen Polyurethan-Verdickers, erstellt nach [BRRS09]	12
4	Netzstruktur durch Verdickermittel in Latex-Dispersion (mit und ohne Tensid), erstellt nach [Mez16]	13
5	Fließkurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Hol10]	14
6	Viskositätskurven für verschiedene Fluide, erstellt nach [Mun18]	14
7	Viskositätsmessung mit digitalem BROOKFIELD-Rotationsviskosimeter	15
8	NIKURADSE-COLEBROOK-MOODY-Diagramm [Msi17, ]	17
9	Skizze einer Kolbenpumpe	19
10	Skizze einer Membranpumpe	19
11	Skizzen für Rotationspumpen	20
12	Skizze für redundanzfreies Dosiersystem, erstellt nach [Vet02]	21
13	Skizze für Dosiersystem mit Redundanz, erstellt nach [Vet02]	21
14	Vereinfachtes R& I - Fließbild	26
15	Beispiel eines EMSR-Stellenplans	27
16	Allgemein heuristisches Entscheidungsverfahren, erstellt nach [GK13]	29

Tabellenverzeichnis

1	Allgemeiner Vergleich der Gebinde IBC und Fass [Kam22]	9
2	Temperaturklassen laut EU-Richtlinie 2014/34/EU, erstellt nach [Ign15]	11
3	Strömungsformen und ihre Reynoldszahlen [Fot14]	16
4	Maße für Stahlrohre in Millimetern aus unlegierten Stählen in Abhängigkeit von Nennweite und Nenndruck (Richtwerte), erstellt nach [Ign15]	24
5	Rohrleitungsspezifikation der ALBERDINGK BOLEY LEUNA GMBH .	25
6	Viskositätsbereiche der verschiedenen Spindeln in Abhängigkeit von der Drehzahl, erstellt nach [Ste16]	33
7	Messparameter und Massenanteile für verdünnte Viskositätsmessungen	34

Anhang

Abkürzungsverzeichnis